



Conception et validation de plateformes de communication autour du corps humain, à l'échelle de l'individu et du groupe

Matthieu Lauzier

► To cite this version:

Matthieu Lauzier. Conception et validation de plateformes de communication autour du corps humain, à l'échelle de l'individu et du groupe. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. INSA de Lyon, 2015. Français. NNT : 2015ISAL0027 . tel-01267159v2

HAL Id: tel-01267159

<https://hal.inria.fr/tel-01267159v2>

Submitted on 24 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Numéro d'ordre : 2015ISAL0027

Thèse

CONCEPTION ET VALIDATION DE PLATEFORMES DE COMMUNICATION AUTOUR DU CORPS HUMAIN, À L'ÉCHELLE DE L'INDIVIDU ET DU GROUPE

Présentée devant

L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

pour l'obtention

DU GRADE DE DOCTEUR

ÉCOLE DOCTORALE ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE

par

MATTHIEU LAUZIER

Thèse réalisée au laboratoire CITI, encadrée par Jean-Marie GORCE, Antoine
FRABOULET et Tanguy RISSET

Equipe Inria SOCRATE, Laboratoire CITI, INSA LYON

En partenariat avec

EUROMEDIA FRANCE

Soutenue le vendredi 3 avril 2015

Jury

Patrice QUINTON	Professeur des universités, <i>ENS Rennes</i>	Examinateur
Christophe LE MARTRET	Ingénieur, HDR, <i>Thales Communications</i>	Rapporteur
Olivier BERDER	Professeur des universités, <i>IRISA Lannion</i>	Rapporteur
Jean-Marie GORCE	Professeur des universités, <i>INSA Lyon</i>	Directeur
Tanguy RISSET	Professeur des universités, <i>INSA Lyon</i>	Encadrant
Antoine FRABOULET	Ingénieur, <i>HiKoB S.A.</i>	Encadrant

L'ensemble des travaux développés dans cette thèse ont été financés par le partenariat
industriel entre le laboratoire CITI et la société EUROMEDIA FRANCE.

"Well, Sir, I have a silly walk and I'd
like to obtain a Government
grant to help me develop it."
— Monty Python's Flying Circus
The ministry of silly walks

Aux femmes de Juarez, à l'une d'entre elles en particulier.

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier mes encadrants, qui m'ont accompagné tout au long de mon projet de thèse. Jean-Marie, Antoine, Tanguy, mais aussi Hervé m'ont énormément apporté, chacun avec son style et sa personnalité, sur les plans humain, scientifique et technique. J'ai beaucoup apprécié leur confiance et leur patience, et je crois que j'ai encore beaucoup de choses à apprendre d'eux.

Je remercie également très chaleureusement Rudy et Jean-Michel, qui m'ont également accordé leur confiance, et grâce à qui nous avons eu l'opportunité de faire de belles réalisations. La découverte du monde de la télévision en lien avec le sport de haut niveau, que je connaissais très peu, est un réel enrichissement. Merci à toute l'équipe Euromedia, conduire des expérimentations dans un tel contexte est une expérience passionnante.

Merci à chacun des membres d'HiKoB, qui ont rendu possibles toutes les réalisations pratiques de cette thèse, pour le plaisir de travailler avec eux.

A Olivier Berder et Christophe Le Martret, j'adresse mes sincères remerciements, d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi qu'à Patrice Quinton, d'avoir accepté d'évaluer mon travail, c'est un grand honneur qu'ils me font.

Ma famille a également été d'un grand soutien, mes parents en particulier, toujours à l'écoute. Mes frères et soeurs, neveux et nièces, sont des personnes formidables, et Mémé doit être contente, elle aussi. J'ai la chance également d'avoir de très bons amis, à Lyon, Grenoble, Dijon et ailleurs, auxquels j'adresse une pensée joyeuse.

Quant aux nombreux camarades du CITI, que je ne saurais énumérer, pour les discussions, la bonne humeur, les mots croisés (merci aussi à messieurs Moinot et Dag'Naud), toutes ces bonnes choses du coin café, aux collègues thésards qui purent m'entendre "râler" à quelques reprises dans le bureau, à Gaëlle, Joëlle et Margarita sans qui nous ne serions pas grand chose, j'adresse des pensées émues.

Enfin, je ne sais comment remercier Betsy pour tout ce qu'elle me donne, pour sa présence malgré la distance, pour sa patience dans les moments difficiles, et sa joie profonde. Je te dédie cette thèse, petite femme de Juarez.

Résumé

Depuis plusieurs années, bénéficiant de nombreuses évolutions technologiques, le domaine de l'instrumentation sans fil a conquis de nouveaux champs d'application, comme le suivi de paramètres physiologiques des personnes, par le développement des réseaux de capteurs sans fil autour du corps humain (BAN, pour *Body Area Networks*). Majoritairement orienté vers le domaine médical et l'amélioration des conditions de vie des patients, ce type de plate-forme s'est plus récemment étendu à d'autres activités, notamment aux loisirs et au sport. Selon le contexte applicatif, les hypothèses et les contraintes liées à ces réseaux peuvent être très variées, c'est pourquoi le développement de mécanismes de communication adaptés est nécessaire.

Au cours de mes travaux de thèse, je me suis intéressé à la réalisation de plate-formes de collecte de données pour des applications sportives en situation de mobilité. Dans une première partie est abordée la collecte d'informations individuelles, pour laquelle nous présentons une preuve de concept en contexte sportif, avant d'apporter des éléments complémentaires à la modélisation des canaux des BAN et aux stratégies de communication pour la collecte individuelle.

Ensuite, nous abordons la réflexion sur la collecte d'informations dans les réseaux denses et mobiles, en proposant des algorithmes distribués basés sur le consensus permettant d'identifier des groupes de façon dynamique, à petite et large échelle. Des réalisations pratiques à chaque étape de mes travaux de thèse permettent la validation des plate-formes développées, grâce à un ensemble conséquent de données collectées sur le terrain. L'analyse des données fournit également des éléments pour mieux caractériser les communications, notamment à large échelle, ce qui ouvre de nombreuses pistes quant à de futurs travaux. De plus, si un fort contexte applicatif est présent dans ces travaux, les méthodes d'analyse et les algorithmes développés sont valorisables et extensibles à d'autres domaines.

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil autour du corps humain, Applications sportives, Algorithmes distribués, Consensus, Systèmes embarqués, Réseaux mobiles

Abstract

The technological evolutions which have taken place for the last decades allowed the emergence of new application fields, such as the wireless monitoring of physiological parameters collected on the human body, with the development of Wireless Body Area Networks (WBANs, or BANs). Mostly dedicated to the medical domain and the improvement of the patients' comfort and safety, this kind of platforms more recently extended to other kinds of activities, such as sports and leisures. According to the applicative context, the hypotheses and constraints associated to these networks can vary drastically, yielding the necessity of developing adapted communication mechanisms.

The works presented in this these have focused on the realization of data collection platforms for mobile sports applications. In a first part, we concentrate on the individual data collection, for which we give a proof of concept in the context of a Marathon race, before aiming at a better understanding of individual channel models and cooperative mechanisms for on-body data centralization. In a second part, we are interested in dense and mobile networks consisting in an important number of coexisting BANs. Our aim is to propose distributed algorithms based on consensus to allow dynamic group detection, with a variable scale.

The validation of the approaches developed in this document is performed by practical implementations and experiments at each step of this work, thanks to an important amount of real world collected data . Through extended analyzes, we provide elements allowing to characterize the communication within mobile BANs, and particularly large scale networks. Although guided by the strong applicative context of live TV broadcast, these works and analysis methods don't lose in generality, and this challenging and original context opens a lot of perspectives.

Key Words: Wireless body area networks, Sports applications, Distributed algorithms, Consensus, Embedded systems, Mobile networks

Contents

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	v
1 Introduction	1
I Collecte de données issues de capteurs embarqués sur le corps humain	5
2 Contexte et état de l'art	7
2.1 Introduction	8
2.2 Réseaux de capteurs sans fils	8
2.3 Réseaux de capteurs autour du corps humain	10
2.3.1 Architecture d'un réseau BAN	12
2.3.2 Contraintes applicatives	13
2.3.3 Modèles de canaux des BAN	14
2.3.4 Protocoles de communication pour les BAN	16
2.3.5 Applications sportives	20
2.4 Plateforme mise en œuvre pour la collecte de données en contexte sportif	21
2.4.1 Architecture générale	22
2.4.2 Systèmes HiKoB	23
2.4.3 Communication radio	26
2.4.4 Architecture logicielle	28
3 Preuve de concept : Marathon de Paris 2012	29
3.1 Introduction	30
3.2 Contexte applicatif	31
3.2.1 Equipement proposé	32
3.3 Informations collectées par les capteurs	33
3.3.1 Données issues des accéléromètres	33
3.3.2 Données issues des semelles	34
	vii

Contents

3.3.3	Données issues du GPS	35
3.4	Mise en place du réseau	35
3.4.1	Topologie du réseau BAN	35
3.4.2	Protocole de communication	36
3.5	Expérimentation	39
3.5.1	Déroulement de la course	39
3.5.2	Données collectées	40
3.6	Analyse des résultats	40
3.6.1	Estimations générales	41
3.6.2	Analyse des pertes	42
3.6.3	Analyse des liens	44
3.7	Conclusion et perspectives	50
4	Mesures maillées des canaux des BAN	51
4.1	Introduction	51
4.2	Plate-forme de mesure et cadre expérimental	52
4.2.1	Matériel utilisé	53
4.2.2	Conception de la plate-forme de mesure	53
4.2.3	Cadre expérimental	55
4.3	Analyse des canaux	58
4.3.1	Stabilité temporelle du canal	61
4.3.2	Symétrie des liens	63
4.4	Coopération et contrôle de puissance	67
4.4.1	Variation de la puissance d'émission	68
4.4.2	Algorithmes coopératifs	70
4.5	Conclusion	75
II	Collecte de données issues de réseaux denses et mobiles	79
5	Compléments à l'état de l'art	81
5.1	Introduction	81
5.2	Collecte d'information dans les réseaux mobiles	82
5.3	Localisation et mesure de distance pour les réseaux de capteurs	84
5.4	Consensus distribué	87
5.5	Applications sportives	88
5.5.1	Cas du cyclisme	88
5.5.2	Connectivité dans les réseaux multi-BAN sportifs	90
5.6	Nouveau contexte applicatif	91
6	Algorithmes de détection de groupes	95
6.1	Introduction	96
6.2	Détection de groupes statiques	97

6.2.1	Présentation de l'algorithme	97
6.2.2	Analyse de la convergence	98
6.2.3	Liens non fiables	101
6.3	Extensions de l'algorithme	101
6.3.1	Prise en compte de la proximité	102
6.3.2	Adaptation à des réseaux mobiles	103
6.4	Dispositif expérimental et calibration	105
6.4.1	Dispositif expérimental	105
6.4.2	Estimation de la proximité par RSSI	106
6.4.3	Calibration et protocole de communication	110
6.4.4	Déroulement de l'expérience et résultats	111
6.5	Conclusion	115
7	Détection de groupes et caractérisation d'un réseau cycliste complet	117
7.1	Introduction	118
7.2	Objectifs applicatifs, passage à l'échelle complète	119
7.3	Extensions de l'algorithme	121
7.3.1	Synchronisation distribuée du réseau	121
7.3.2	Ajustement dynamique de la puissance d'émission	122
7.3.3	Réinitialisation du vecteur	123
7.3.4	Algorithme complet	125
7.4	Description de l'expérimentation	126
7.4.1	Collecte d'informations en direct	126
7.4.2	Données collectées	127
7.5	Analyse des résultats	128
7.5.1	Matrices d'adjacence dynamiques	129
7.5.2	Analyse de la convergence	129
7.5.3	Estimations du diamètre du graphe	132
7.5.4	Fiabilité des liens	133
7.5.5	Correlation entre ED et succès de transmission	134
7.5.6	Stabilité du voisinage	135
7.5.7	Corrélation de l'évolution du voisinage	137
7.5.8	Connexion avec les puits	138
7.6	Conclusion	140
8	Conclusion et perspectives	143
A	Annexes	149
A.1	Preuve du théorème 6.2.1	149
A.2	Preuve du théorème 6.2.2	150
	Liste des abréviations	153

Contents

Bibliographie

155

1 Introduction

Les technologies de communication sans fils, en permanente évolution depuis de nombreuses années, rendent sans cesse possibles de nouvelles applications, répondant à des besoins particuliers. L'explosion de ce vaste domaine soulève de jour en jour d'importantes problématiques de recherche, s'étendant à tous les niveaux du réseau (couche physique, accès au médium, routage ...). Les préoccupations et thématiques classiques visent généralement une constante augmentation du débit, la garantie d'une qualité de service ou encore la réduction de l'énergie consommée.

Depuis plus de deux décennies, nous avons vu se développer des réseaux particuliers, constitués d'ensembles potentiellement vastes d'objets communicants peu coûteux et autonomes, à faible consommation et capacité, capables de collecter des informations sur leur environnement proche : les *réseaux de capteurs sans fils*. Dotés d'une architecture (matérielle et réseau) simple, capables de s'auto-organiser, la facilité de déploiement et les connaissances apportées par ces systèmes ont conquis de nombreux domaines depuis leur apparition. Nous nous intéressons dans cette thèse particulièrement à l'un d'entre eux, celui des réseaux de capteurs sans fil autour du corps humain, en anglais *Body Area Networks* (BAN). Celui-ci, apparu plus récemment grâce aux progrès de l'électronique, consiste à équiper un être humain d'un ensemble de capteurs, pouvant collecter et transmettre diverses informations physiologiques mesurées sur la personne.

Les problématiques et les caractéristiques des transmissions associées aux BAN sont suffisamment éloignées de celles des réseaux de capteurs classiques pour en faire un domaine à part, sur lequel se penchent de nombreux travaux de recherche. Si les principaux objectifs des BAN touchent au domaine médical, avec l'exemple typique du suivi de patients à distance, l'extension des champs d'application vers des domaines originellement plus à la marge, comme le sport ou les jeux interactifs, est en plein essor.

Concernant le sport, on peut voir en effet se multiplier depuis quelques années les

produits intégrant des systèmes embarqués, connectés ou non, donnant l'opportunité à chaque sportif, amateur ou professionnel, de suivre, planifier ou corriger ses performances. Les connaissances apportées par les capteurs sont nombreuses et variées, et la demande du public est croissante. En revanche, l'intégration de tels systèmes au suivi en direct d'événements sportifs de niveau professionnel est encore loin d'être démocratisée. Si dans ce domaine de nombreux acteurs sont intéressés par les apports de la technologie sans fil, les enjeux associés sont tels que de nombreuses garanties doivent être apportées avant qu'une exploitation ne soit rendue possible. Cela concerne aussi bien la confidentialité des données (quelles données, pour quels destinataires ?) et la sécurité des échanges, l'ergonomie, ou encore les enjeux financiers. La garantie d'un fonctionnement équitable pour l'ensemble des intéressés doit également être assurée, afin de ne pas risquer de favoriser par exemple la connaissance d'une équipe au détriment d'une autre,

Le projet dans lequel s'inscrivent ces travaux de thèse résulte d'un partenariat industriel entre le laboratoire CITI (Centre d'Innovation dans les Télécommunications et l'Intégration de services), développant depuis plusieurs années des travaux majeurs autour des BAN, et la société Euromedia, spécialisée dans la retransmission télévisuelle en direct de nombreux événements sportifs. Ce projet a pour but de concevoir et de valider l'intégration de plate-formes capables de rendre accessibles au public et aux différents acteurs impliqués un ensemble d'informations puisées au coeur d'événements sportifs professionnels. Nous nous intéressons tout particulièrement dans cette thèse à des scénarios de course pour lesquels l'infrastructure, constituée de capteurs embarqués sur les sportifs et de puits de collecte, est complètement mobile. Dans un tel contexte, une forte contrainte sur le délai d'acheminement des informations, liée à la nature du suivi d'événements en direct, est imposée par l'application.

Si l'on peut envisager à terme la cohabitation d'un grand nombre de sportifs, chacun équipé d'un BAN centralisant des informations issues de plusieurs capteurs, et capables d'acheminer ces données par des protocoles multi-sauts, il semble raisonnable de distinguer dans un premier temps deux approches complémentaires. La première, qui se rapproche de la recherche classique portant sur les BAN, consiste à caractériser les liens entre des capteurs embarqués sur un être humain, dans le but de la centralisation et de l'évacuation des informations issues d'un seul individu. On s'attachera dans ce cas à comprendre notamment les effets du corps humain en mouvement sur les transmissions, et à améliorer la fiabilité des liens par la mise en œuvre de protocoles développant des mécanismes de coopération.

La seconde approche, à savoir la construction d'un réseau impliquant plusieurs centaines de coureurs, a jusqu'à présent peu été étudiée. Elle constitue néanmoins un véritable défi, qu'il convient de relever pas à pas, du niveau le plus simple au plus complexe. Ces réseaux peuvent en effet être vus comme un cas très particulier de réseaux ad hoc mobiles, au sein desquels un ensemble de facteurs, comme le mou-

vement, la présence du corps humain, la densité, les distances relatives, qui n'ont de cesse d'évoluer, ont un impact extrêmement fort sur la qualité des communications. Il semble difficile d'envisager, sans connaissance a priori de ces mécanismes, la cohabitation de plusieurs BAN concurrents, ou un acheminement efficace d'informations individuelles vers les points d'accès. Ces considérations orientent notre réflexion vers des mécanismes permettant de faire émerger de manière distribuée des informations globales du réseau.

Motivées par une finalité applicative et la réalisation de plate-formes expérimentales permettant leur validation tout au long de la thèse, les contributions que nous décrivons dans ce document sont les suivantes :

- Nous nous attachons à démontrer la faisabilité de l'intégration d'un BAN individuel dans un contexte de retransmission en direct d'événements sportifs. Par la réalisation d'une "preuve de concept" réalisée lors d'un événement officiel, nous validons l'ensemble de la chaîne de communication, depuis la mesure jusqu'à l'intégration des données au flux vidéo, et une première interprétation des liens radio entre les différents agents du réseau est effectuée.
- Nous fournissons ensuite une étude approfondie des canaux des BAN individuels, basée sur des mesures acquises en conditions réelles de mouvement. Cette étude, dont l'originalité comporte la réalisation d'une plate-forme de mesure du maillage du réseau complet, vise à estimer la qualité des métriques fournies par des capteurs industriels, confrontées aux modèles existants, et à quantifier l'apport fourni par des protocoles coopératifs sur la puissance rayonnée et la fiabilité des liens, évalué sur des données acquises en conditions réelles.
- Dans un souci de complémentarité avec ces travaux portant sur la collecte de données au sein des BAN individuels, nous nous intéressons aux communications au sein de réseaux constitués de plusieurs BAN, dans le but d'obtenir une vue globale d'un événement sportif. Sans perdre en généralité, nous proposons un ensemble d'algorithmes permettant la détection dynamique de groupes mobiles basés sur la notion de consensus distribué. Cette approche, pour laquelle nous étudions en détail le processus de convergence, est validée de manière théorique. Elle l'est également en pratique, avec la réalisation d'une plate-forme assurant le suivi en direct de l'évolution d'un groupe cycliste restreint.
- Nous nous intéressons finalement au passage de ces algorithmes à une échelle de plusieurs centaines de capteurs, ce qui correspond à la finalité applicative majeure, à savoir le suivi d'une course cycliste complète (jusqu'à 200 coureurs). Nous décrivons les problèmes posés par la construction de tels réseaux, liés notamment à la mobilité, qui induit des variations de densité et d'étendue du réseau, et proposons des solutions simples visant à en limiter les effets. Enfin,

la réalisation d'une mise en œuvre expérimentale à pleine échelle nous permet d'obtenir des premières connaissances essentielles sur le comportement d'un réseau cycliste complet.

Concernant l'organisation du document, nous avons fait le choix de deux parties distinctes et complémentaires, la première dédiée à la collecte d'informations individuelles issues de plusieurs capteurs formant un BAN, la seconde étant dédiée à la construction et à la collecte d'informations issues de réseaux denses et mobiles comportant plusieurs BAN en coopération.

La première partie du document est organisée de la façon suivante : dans le chapitre 2, nous nous intéressons tout d'abord à explorer, à travers l'étude de différents travaux de la littérature, les particularités des BAN au sein de la vaste famille des réseaux de capteurs sans fils. Dans l'optique d'une collecte d'informations individuelles, plusieurs aspects sont abordés, comme la propagation, les protocoles de transmission, ainsi que le contexte sportif. Nous présentons également les objectifs applicatifs motivant nos différentes contributions, ainsi que l'architecture générale des plate-formes mises en œuvre lors de l'ensemble des expérimentations réalisées pour la validation de nos approches. Le chapitre 3 décrit une première "preuve de concept", visant à montrer la faisabilité de l'intégration d'un réseau BAN à la retransmission télévisuelle, lors du Marathon de Paris 2012. De premiers résultats d'intérêt sur le comportement des transmissions dans de telles conditions sont tirés de cette réalisation pratique, que nous complétons ensuite par une étude plus approfondie des canaux des BAN individuels, dans le chapitre 4.

Pour compléter ces aspects individuels, la seconde partie, visant la supervision d'événements sportifs composés d'un grand nombre de BAN mobiles, est constituée de 3 chapitres : le chapitre 5 présente les problématiques développées dans cette seconde partie, notamment la communication dans les réseaux mobiles, les thématiques de localisation et de consensus distribué. Nous nous intéressons également à différentes réalisations visant le suivi de performances cyclistes et la collecte d'informations issues de réseaux multi-BAN denses et mobiles. Le nouvel objectif applicatif, à savoir le suivi de groupes cyclistes, est présenté à la fin de ce chapitre. Nous présentons dans le chapitre 6 l'ensemble d'algorithmes permettant la détection de groupes mobiles, validés théoriquement et expérimentalement. Le passage de ces algorithmes à l'échelle d'une course cycliste complète allant jusqu'à 200 coureurs est décrit dans le chapitre 7. Nous fournissons également une importante analyse de ce réseau complet.

Cette dernière partie ouvre de nombreuses perspectives et débouchés quant à la suite du projet, à travers notamment la réalisation d'un environnement de simulation réaliste du contexte cycliste, permettant l'évaluation d'algorithmes et de protocoles assurant une collecte d'informations de plus en plus précises au sein du réseau. Ces perspectives sont précisées dans le chapitre 8, qui conclut cette thèse.

Collecte de données issues de capteurs embarqués sur le corps humain

Partie I

2 Contexte et état de l'art

Sommaire

2.1	Introduction	8
2.2	Réseaux de capteurs sans fils	8
2.3	Réseaux de capteurs autour du corps humain	10
2.3.1	Architecture d'un réseau BAN	12
2.3.2	Contraintes applicatives	13
2.3.3	Modèles de canaux des BAN	14
2.3.4	Protocoles de communication pour les BAN	16
2.3.5	Applications sportives	20
2.4	Plateforme mise en œuvre pour la collecte de données en contexte sportif	21
2.4.1	Architecture générale	22
2.4.2	Systèmes HiKoB	23
2.4.3	Communication radio	26
2.4.4	Architecture logicielle	28

2.1 Introduction

La première partie de ces travaux de thèse s'intéresse à la collecte de diverses informations sur un individu, via la mise en place d'un BAN, plus particulièrement pour des applications sportives mobiles. Le BAN est un Réseau de Capteurs sans Fil (RCsF) particulier, possédant des caractéristiques propres, sur lequel portent de nombreuses recherches depuis plusieurs années. En effet, tant au niveau des contraintes applicatives que des caractéristiques de propagation ou des besoins en ressources, le BAN se distingue des RCsF "classiques", et la plupart des travaux visant les RCsF s'avèrent peu adaptés aux BAN. De plus, les applications sportives constituent un champ de recherche relativement récent des BAN, possédant une grande diversité de scénarios à explorer. Dans ce domaine, un aspect expérimental et pratique est très important, afin d'obtenir les connaissances nécessaires à la modélisation de chaque scénario étudié, et concevoir des réseaux adaptés qu'il est possible de valider en conditions réelles, puis d'améliorer grâce au retour fourni par l'expérimentation.

Dans la première partie de ce chapitre, après une introduction générale aux RCsF, nous exposons plusieurs aspects et travaux spécifiques aux BAN, de l'application à la propagation, avant de nous intéresser à la réalisation d'applications embarquées pour le sport. Dans une seconde partie, nous précisons le contexte applicatif général des différentes expérimentations que nous avons eu l'opportunité de mener durant la thèse, de l'architecture complète de communication aux caractéristiques des nœuds communicants, notamment les capteurs embarqués sur le corps humain et la technologie radio mise en œuvre.

2.2 Réseaux de capteurs sans fils

Un RCsF peut être défini comme un ensemble de systèmes autonomes, les *nœuds*, capables de collecter des informations physiques issues de leur environnement proche et de les transmettre par radio vers des nœuds centraux, les *puits*, en charge de la collecte et de l'acheminement des données vers un utilisateur distant. Les avancées en électronique, notamment le développement des microsystèmes électro-mécaniques, en anglais *Micro Electro-Mechanical Systems* (MEMS), ont permis la conception de capteurs peu coûteux, à faible consommation d'énergie, pouvant conduire à des déploiements de plusieurs centaines, voire milliers de nœuds, selon les applications visées. De nombreux exemples d'applications sont répertoriés dans [Akyildiz et al., 2002], on peut notamment citer les déploiements à but militaire (surveillance, détection d'attaque), environnemental (mesure de pollution, détection de feux de forêt) ou sanitaire (suivi de patient). Chaque nœud d'un RCsF est typiquement constitué des éléments suivants:

- un ou plusieurs capteurs (température, accélération, localisation...).
- une radio permettant de recevoir et de transmettre des informations.
- un microcontrôleur, mettant en lien mesure et communication via un logiciel embarqué, en charge de l'exécution de l'application et du protocole réseau.
- une source d'énergie, dans la plupart des cas constituée par une batterie, bien qu'on puisse voir émerger des systèmes de récupération d'énergie (solaire, vibrations...) visant à réduire la part d'énergie fournie par la batterie [Seah et al., 2009].
- d'éventuels actionneurs, qui selon l'état de la mesure effectuée ou du réseau, peuvent déclencher des actions particulières.

Cette architecture classique est illustrée par la figure 2.1, qui met en évidence les interactions entre les éléments constitutifs du nœud . Généralement, la pile réseau d'un nœud se résume à trois couches élémentaires, à savoir:

- la couche physique (PHY), qui assure la conversion des paquets de données logiques en signaux physiques, leur transmission à travers le médium, et inversement, la réception et la mise en forme des signaux physiques reçus en paquets logiques.
- la couche d'accès au médium, en anglais *Medium Access Control* (MAC), qui définit la manière dont les nœuds accèdent au canal et dialoguent entre eux (synchronisation, mécanismes de veille, contrôle des ressources ...).
- la couche réseau (NET), qui définit le chemin parcouru par les paquets d'information depuis leur source vers leur destination, pour assurer la communication d'un bout à l'autre du réseau.

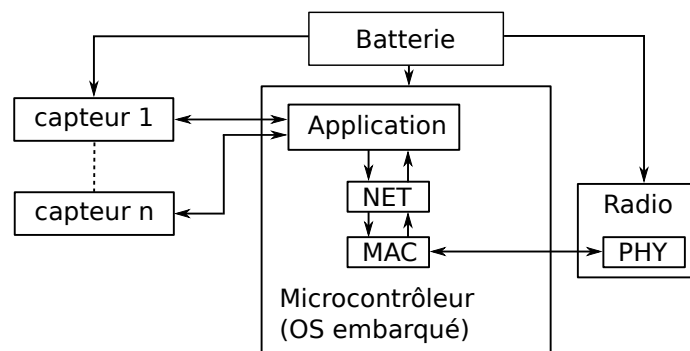


Figure 2.1 – Architecture simplifiée d'un nœud de communication.

Du fait de l'alimentation par batterie et des contraintes liées au déploiement qui rendent le remplacement de la batterie ou son rechargement impossibles, le principal enjeu pour les RCsF est la conservation de l'énergie, afin de maximiser la durée de vie du réseau. Cela induit nécessairement une faible consommation de l'ensemble des éléments, par conséquent des communications à faible portée, un débit restreint et des capacités de calcul ou de stockage limitées. L'élément présentant la plus forte consommation d'énergie étant principalement la radio, il est d'un intérêt majeur de concevoir des stratégies de communication efficaces en énergie. La faible portée des communications, donc la nécessité de transmettre l'information de proche en proche vers le puits font des RCsF des réseaux multi-sauts. Ceci nécessite la mise en œuvre au niveau de la couche réseau de protocoles de routage permettant l'auto-organisation du réseau et l'efficacité en terme de délai d'acheminement des informations et d'énergie consommée. La couche MAC implémentée doit permettre, en accord avec les couches supérieures, une consommation énergétique minimale, notamment en minimisant les périodes d'activité de la radio (mécanismes de réveil, séquençage des transmissions...). Compte tenu du faible débit et des informations à transmettre, il est également possible d'implémenter des méthodes de traitement du signal au niveau de la couche applicative des nœuds. Ceux-ci peuvent ainsi extraire des informations utiles du signal (fréquence, moyenne, amplitude...) plutôt que de transmettre un flux de données brutes conséquent. Le codage de source et/ou de canal (compression de données, correction d'erreurs...) est également envisageable, afin de réduire la quantité d'informations transmises (gain en énergie) ou de pallier les défauts de fiabilité du canal radio.

La norme IEEE 802.15.4 [IEEE, 2011], dont une première version date de 2003, majoritairement utilisée dans les RCsF, définit plusieurs couches PHY à faible consommation dans différentes bandes de fréquences (incluant récemment les communications en bande ultra-large, en anglais *Ultra Wide Band* (UWB)), ainsi qu'une couche MAC prenant en compte les contraintes applicatives des RCsF. La couche physique du composant radio utilisé dans l'ensemble des expérimentations effectuées dans le cadre de cette thèse répond à cette norme, nous détaillons ses principales caractéristiques en section 2.4.3 de ce chapitre. Depuis plusieurs années, la miniaturisation des nœuds et la diversification des grandeurs mesurables ont ouvert un important champ de recherches autour d'applications à base de capteurs embarqués *sur*, voire *dans* le corps humain. La section suivante présente les spécificités et problématiques associées à ce type de réseaux.

2.3 Réseaux de capteurs autour du corps humain

La conception de BAN est rendue possible par les récentes évolutions technologiques, qui permettent de réaliser des objets communicants embarquables sur le corps hu-

main (nous ne traiterons pas dans cette thèse le cas des capteurs implantés à l'intérieur du corps). Cela signifie qu'ils sont suffisamment légers, autonomes et peu encombrants pour ne pas gêner le confort de l'utilisateur et lui permettre une activité normale tout en assurant un suivi fiable de divers paramètres physiologiques. Depuis leur émergence, la recherche autour des BAN s'est principalement focalisée sur les domaines liés à la santé, eu égard notamment au contexte mondial de vieillissement de la population [Movassaghi et al., 2014]. De nombreux avantages humains et économiques peuvent en effet être apportés par le fait de pouvoir suivre l'évolution d'un patient à distance de façon fiable, en réduisant les besoins d'hospitalisation et en garantissant une meilleure autonomie aux personnes. On peut notamment citer la prévention du risque d'accident vasculaire, le suivi du diabète, de la tension artérielle [Latré et al., 2011]... Bien que les applications médicales constituent la grande majorité de la recherche dans le domaine des BAN, la part des applications non médicales est néanmoins grandissante, notamment le suivi de performances sportives, la diffusion en temps réel de contenu audio, vidéo, le jeu interactif (contrôle par les mouvements du corps) [Movassaghi et al., 2014].

Les BAN font partie de la famille des réseaux de capteurs; ils présentent néanmoins des caractéristiques particulières qui en font un domaine à part, comme l'expliquent [Chen et al., 2011]:

- le *nombre de nœuds* placés sur la personne est généralement limité. En effet, les modèles de déploiement couramment étudiés mettent en scène au maximum une douzaine de capteurs, dans un espace par définition restreint. L'aspect multi-sauts des BAN se réduit généralement à un ou deux sauts.
- le *débit* peut s'avérer élevé pour des applications de type *streaming*, alors que les réseaux de capteurs classiques nécessitent souvent une faible bande passante.
- le signal radio est très fortement atténué lorsqu'il traverse les tissus du corps humain, de l'ordre de 6 dB/cm à 2.4 GHz, ce qui se manifeste par d'importants phénomènes de *masquage*, durant lesquels la fiabilité des communications peut être altérée.
- la *mobilité* est très forte. Selon l'activité de la personne (travail de bureau, course à pied, marche au milieu d'une foule dense ...), l'environnement et la *visibilité* entre les nœuds et les puits peuvent évoluer de façon très rapide.

Les sections suivantes donnent davantage de précisions sur les caractéristiques des réseaux BAN, ainsi que plusieurs travaux effectués autour de la communication dans ces réseaux et le développement d'applications sportives.

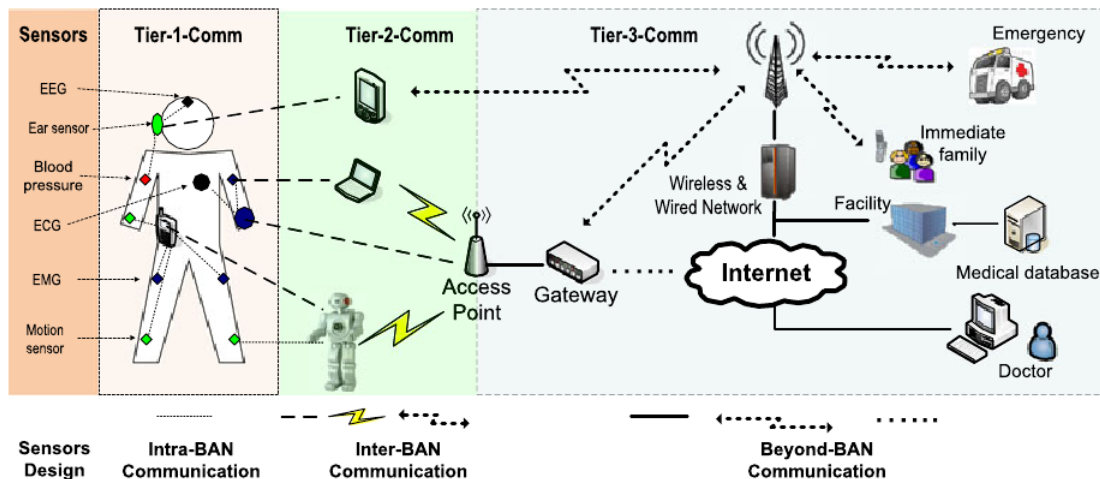


Figure 2.2 – Architecture complète d'un BAN, tirée de [Chen et al., 2011]. Trois niveaux de communication sont mis en évidence: intra-BAN, inter-BAN et extra-BAN (Beyond-BAN).

2.3.1 Architecture d'un réseau BAN

On considère l'architecture générale d'un BAN individuel comme étant constituée de 3 niveaux de liaisons, comme décrits dans la littérature [Chen et al., 2011]. Un premier niveau *intra-BAN*, vise à centraliser l'ensemble des informations fournies par les capteurs disséminés sur le corps humain vers un coordinateur, lui aussi situé sur le corps humain. On attribue généralement au réseau intra-BAN une topologie en étoile, ou mixte étoile/maillage (dans le cas de protocoles de relaying), les liens entre les nœuds sont appelés *on-body*. Les nœuds du réseau intra-BAN sont généralement contraints en énergie, et utilisent des technologies radio à basse consommation (802.15.4, par exemple). Un niveau *inter-BAN* assure la communication entre le coordinateur, un ou plusieurs points d'accès situés à proximité du coordinateur (liens *off-body*), voire les coordinateurs d'autres BAN individuels (liens *body-to-body*). La technologie utilisée pour la communication à ce niveau peut être différente de celle mise en œuvre dans le réseau intra-BAN (Wifi, bluetooth...), le coordinateur, moins contraint en énergie, étant appelé à s'interfacer avec des appareils plus «courants». Enfin, un niveau *extra-BAN* est en charge de l'acheminement des données vers un serveur distant, via Internet, ou des réseaux dédiés, selon l'application.

L'architecture d'un BAN est illustrée par la figure 2.2 tirée de [Chen et al., 2011]. Celle-ci peut varier selon le contexte applicatif, et peut se limiter à un ou deux niveaux seulement.

2.3.2 Contraintes applicatives

Selon l'application visée, un réseau BAN doit pouvoir supporter jusqu'à trois types de trafics de données:

- trafic périodique: les nœuds émettent leurs données de façon régulière. Chaque nœud peut posséder ses propres contraintes de débit.
- transmission à la demande: l'un des acteurs du réseau peut être amené à émettre des informations à des instants non définis à l'avance (début/fin de mesure, changement de configuration. ...).
- propagation d'alertes: dans le cas où un paramètre mesuré dépasse un seuil (application médicale critique, mais aussi niveau de batterie faible...), le nœud doit pouvoir propager l'alerte de façon rapide et fiable. Selon leur nature, différents niveaux de priorité peuvent être donnés aux alertes.

Les applications utilisant les réseaux BAN, comme le suivi périodique, le streaming, sensibles notamment à la latence, peuvent être évaluées par des métriques de Qualité de Service, en anglais *Quality of Service* (QoS) telles que le débit, le délai, les variations du délai, le taux de perte de paquets [Movassaghi et al., 2014]). Le tableau 2.1 tiré de [Patel and Wang, 2010] donne quelques exemples concrets d'applications, ainsi que différents objectifs visés pour celles-ci (débit, latence, rapport cyclique, durée de vie).

Application	Débit	nœuds	Topologie	Latence	BER	Rapport cyclique	Durée de vie
Aide auditive	200 kbps	3	Etoile	<250ms	$<10^{-10}$	<10%	>40h
ECG, EEG	72-86 kbps	<6	Etoile	<250ms	$<10^{-10}$	<10%	>1 sem.
EMG	1.5Mbps	<6	Etoile	<250ms	$<10^{-10}$	<10%	>1 sem.
O2,CO2 Pulsation Température Respiration Tx. glucose Accéléromètre	<10kbps	<12	Etoile	<250ms	$<10^{-10}$	<1%	>1 sem.
Audio	1Mbps	3	Etoile	<100ms	$<10^{-5}$	<50%	>24hr.

Table 2.1 – Sélection d'exemples illustrant la diversité des contraintes applicatives liées aux BAN, tiré de [Patel and Wang, 2010].

Afin de prendre en compte les spécificités des BAN leurs contraintes applicatives, ainsi que l'évolution des technologies radio, la norme IEEE 802.15.6 [IEEE, 2012] a récemment été mise au point. Elle se distingue de la norme 802.15.4, plus spécifique aux réseaux de capteurs classiques, par la définition de couches physiques plus adaptées aux BAN, incluant notamment les communications en bande étroite dans diverses

plages de fréquence, en UWB, ou utilisant la communication au sein du corps humain, en anglais *Human Body Communication* (HBC). La norme 802.15.6 propose également des modèles de canaux pour les BANs, que nous abordons dans la section suivante, ainsi qu'une couche MAC flexible pouvant prendre en compte les différentes contraintes applicatives ainsi que des méthodes de relayage.

2.3.3 Modèles de canaux des BAN

Tout signal radio émis depuis une source vers une destination traverse un canal de propagation, dont l'évolution temporelle influe sur la qualité des échanges d'informations. Cette évolution dynamique est liée aux conditions de transmission (mouvement, environnement, interférences...), on distingue communément quatre contributions à l'affaiblissement des signaux radio [Tse and Viswanath, 2005]:

- une décroissance du signal variant en fonction de la distance entre deux nœuds, caractérisant l'affaiblissement en espace libre.
- des évanouissements rapides, en anglais *fast fading*, dus à la somme constructive ou destructive des ondes radio se propageant selon de multiples trajets (ou multipath).
- des affaiblissements lents, ou masquage, en anglais *slow fading* ou *shadowing*, qui traduisent quant à eux la présence d'obstacles à la transmission entre la source et le destinataire.
- un bruit blanc additif gaussien, en anglais *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), processus aléatoire suivant une loi normale, dû à un ensemble de phénomènes physiques indépendants des trajets parcourus par les ondes.

La connaissance des canaux des BAN est très importante pour la conception de protocoles de communication adaptés. Elle permet notamment de construire des environnements de simulation réalistes, grâce auxquels il est rendu possible d'évaluer les protocoles proposés. La plupart des travaux de modélisation des canaux des BAN sont réalisés à base de mesures, en conditions maîtrisées (chambre anéchoïque) ou en conditions réelles d'utilisation. Nous nous intéressons ici aux travaux de modélisation des canaux principalement autour de 2.4 GHz, pour des capteurs situés sur le corps humain.

Les travaux de [Cotton and Scanlon, 2006], bien que réalisés dans la bande de 868 MHz, sont parmi les premiers à proposer des modèles à base de mesures spécifiques aux BAN. Dans le cas du corps en mouvement, l'analyse statistique des évanouissements conduit à des distributions de Rice, dont le facteur K (rapport entre la

contribution principale et celle des multi-trajets) diminue considérablement en environnement intérieur; l'aspect périodique de certains liens est également illustré. Les travaux de [Hu et al., 2007] décrivent une large campagne de mesures réalisées dans diverses conditions (extérieur, intérieur de voiture, intérieur d'un bâtiment...), mettant en évidence l'importante variabilité de la dynamique des canaux selon les conditions de mouvement et l'environnement dans lequel est placé le sujet. L'aspect dynamique des canaux est évalué par les métriques *Level Crossing Rate* (LCR) et *Average Fade Duration* (AFD), qui caractérisent la fréquence et la durée des évanouissements. Le modèle présenté par le groupe de travail consacré au canal pour l'élaboration de la norme IEEE 802.15.6 [Yazdandoost et al., 2009] liée aux BAN, assimile le masquage à une loi normale centrée sur l'affaiblissement moyen, en précisant que la variance de cette composante dépend du scénario et de la position des capteurs. Dans [Smith et al., 2011], des mesures de canaux BAN sont effectuées sur une journée complète, le sujet ayant une activité normale (bureau, extérieur, conduite...). Dans ce cas, sans considérer de scénario particulier, une distribution normale des évanouissements semble convenir le mieux à la modélisation des canaux.

L'assimilation des canaux à des distributions statistiques courantes, si elle apporte une connaissance quant à la part des multi-trajets, doit être complétée par une analyse des variations temporelles, notamment sur des scénarios de mouvement régulier. Dans [Kim and Takada, 2009], la stabilité du canal est estimée pour deux scénarios de mouvements répétitifs, notamment par la mesure du *temps de cohérence*, durée pour laquelle le canal peut être considéré stable. Outre une grande stabilité, les auteurs mettent en évidence des mesures très différentes selon les scénarios et les liens considérés, et tendent également à confirmer la périodicité du masquage dans le cas de mouvements périodiques. Les travaux de [Zhang et al., 2009] mettent également en évidence une faible probabilité de grande variation du canal sur un intervalle de 25 ms, ainsi que l'influence de la rapidité du mouvement sur la stabilité. Dans [Fu et al., 2011] et [Fu et al., 2012], les auteurs déduisent un temps de cohérence d'environ 125 ms pour la marche et 25 ms pour la course.

Si l'aspect périodique des canaux BAN a été introduit dans certaines contributions précédemment citées, les travaux de [Cotton et al., 2009] la mettent en évidence par des valeurs élevées d'autocorrélation des canaux à la fréquence du mouvement. De plus, une analyse simultanée des canaux permet d'examiner les corrélations spatiales entre les liens; si celles-ci peuvent s'avérer élevées en l'absence de mouvement, elles tendent à diminuer avec le mouvement, bien qu'on puisse distinguer de nettes différences entre un environnement extérieur et intérieur. Dans ce dernier cas, très soumis aux multi-trajets, les corrélations spatiales semblent très peu significatives. La modélisation de l'évolution temporelle conjointe du masquage est également appuyée par [D'Errico and Ouvry, 2010], dans l'optique de la validation de protocoles coopératifs.

Si la plupart des travaux de mesure des canaux des BAN sont réalisés au moyen d'appareils traditionnels, certains d'entre eux exploitent les fonctionnalités apportées par les capteurs industriels. Ceux-ci apportent en effet une plus grande liberté quant aux scénarios développés, et peuvent être embarqués sur de longues durées, évitant, certes au détriment de la résolution temporelle et de la précision de mesure, les contraintes inhérentes aux dispositifs classiques. Les travaux de [Smith et al., 2011] et [Chaganti et al., 2010] conduisent par exemple à l'élaboration d'importantes bases de données sur de longues durées, pouvant servir à la conception et à la validation de protocoles réalistes. [Kim et al., 2012] présente également une plateforme de mesure à base de capteurs industriels communiquant selon une topologie en étoile, et distinguant plusieurs scénarios de la vie quotidienne. Les auteurs mettent également en évidence des corrélations spatiales entre les liens.

L'importance de modèles incluant les corrélations spatiales et les évolutions conjointes des canaux est prépondérante, notamment lorsque [Maman et al., 2009] défendent la nécessité de mise en place de protocoles coopératifs afin d'atténuer les effets du masquage. La connaissance des corrélations du masquage permet en effet de valider des algorithmes proposant un choix adapté et dynamique de méthodes de relayage. Nous abordons le problème de la modélisation et de la coopération dans le chapitre 4 de cette thèse.

2.3.4 Protocoles de communication pour les BAN

Un protocole de communication, dans un BAN, a pour but d'organiser les échanges de données entre les différents nœuds du réseau pour satisfaire des contraintes liées à l'application. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, selon le contexte applicatif, le BAN doit pouvoir prendre en charge différents types de trafic, assurer la fiabilité des transmissions, la qualité de service (débit, délai...) ou la durée de vie du réseau. La radio, lorsqu'elle est active, est l'élément du nœud dont la consommation énergétique est la plus forte, de ce fait de nombreux travaux sur les protocoles s'orientent vers une utilisation efficace de cette ressource, donc vers la limitation des sources de pertes d'énergie, à savoir [Ullah et al., 2012] :

- les collisions: si plusieurs nœuds transmettent un paquet au même instant, les interférences générées empêchent le décodage des paquets, l'énergie utilisée pour la transmission et la réception est perdue, une éventuelle retransmission est nécessaire.
- l'écoute d'un canal inactif: lorsqu'un nœud passe en réception, un message est supposé lui parvenir, la durée, donc l'énergie dépensée dans l'attente du message doit être minimale.
- la surécoute: la réception de paquets par un nœud alors qu'ils ne lui sont pas

destinés est également un facteur de consommation énergétique inutile.

- la part des paquets destinés au contrôle et à l'organisation du réseau: bien que nécessaires pour les communications, ces informations ne sont pas des données utiles du point de vue de l'application.

Les méthodes d'accès au canal compatibles avec les contraintes énergétiques des BAN forment deux grandes familles: les accès par contention, de type accès multiple avec détection de porteuse, en anglais *Carrier Sense Multiple Access* (CSMA) et les accès réservés synchrones, ou accès multiple à répartition dans le temps, en anglais *Time Division Multiple Access* (TDMA). L'accès par contention présente l'avantage d'être facilement adaptable aux changements de topologie, et plutôt destiné au trafic à la demande. Il est en revanche peu efficace en terme de consommation énergétique, de garantie de délai, d'occupation du canal, et peut générer de nombreuses collisions dans le cas d'un trafic élevé. L'accès synchronisé évite les problèmes de collisions et optimise l'utilisation du canal, en réservant à chaque nœud une durée (ou *slot*) durant laquelle il est le seul à transmettre. Cette méthode est mieux adaptée pour des transmissions périodiques et à débit élevé, mais nécessite la mise en place de méthodes de synchronisation (transmission de balises périodiques). L'aspect statique de ce type de protocole le rend également moins flexible.

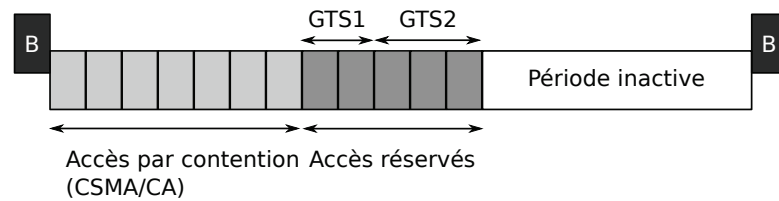
Un point de départ de la réflexion sur les protocoles MAC pour les BAN, est celui de la norme IEEE 802.15.4 [IEEE, 2011]. La norme définit une structure de *super-trame*, composée d'une période active, démarrant par une balise émanant du coordinateur, suivie d'une période d'accès par contention utilisant un accès type CSMA évitant les collisions, en anglais *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), puis d'une période d'accès réservé, *Guaranteed Time Slots* (GTS). S'ensuit une période d'inactivité durant laquelle les radios des nœuds sont mises en veille, jusqu'à la balise suivante. Le principe de ce protocole est illustré par la figure 2.3a. Bien que cette norme soit très utilisée dans les réseaux de capteurs classiques, des protocoles spécifiques ont été mis au point afin de prendre en compte différents aspects des BAN, notamment la diversité des besoins des nœuds. Une vue d'ensemble des protocoles dédiés aux BAN est donnée par [Ullah et al., 2012], [Chen et al., 2011] et [Movassaghi et al., 2014].

La plupart des travaux à l'origine de protocoles dédiés aux BAN sont guidés par l'efficacité énergétique, et considèrent une topologie en étoile. Parmi les premiers, le protocole BSN-MAC [Li and Tan, 2005] propose une adaptation plus efficace en énergie de la couche MAC 802.15.4, en y ajoutant un système réactif permettant d'adapter la super-trame aux besoins des nœuds (application, débit, énergie) de façon dynamique. L'approche synchrone donnée par [Lamprinos et al., 2005], évitant les collisions et réduisant la surécoute, conduit néanmoins à un déséquilibre entre les nœuds esclaves, ceux étant servis les premiers bénéficiant d'une plus grande durée

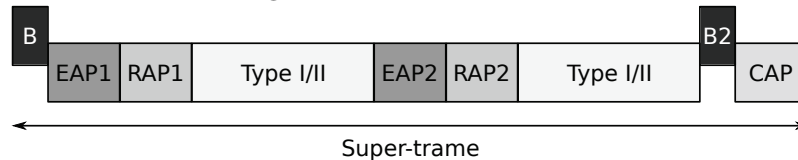
de veille. Dans [Omeni et al., 2008], les auteurs présentent un protocole également hiérarchisé et synchrone permettant l'établissement de plusieurs réseaux BAN, avec un mode gérant la transmission d'alarmes. La recherche d'un canal non occupé est effectuée lors de la création du réseau, une adaptation dynamique n'est pas proposée dans ce travail. Une approche purement basée sur des accès de type TDMA est décrite dans [Marinkovic et al., 2009], destinée à des applications de trafic périodique et une topologie fixe. Une quantité additionnelle de slots, dépendant du taux d'erreur paquet, en anglais *Packet Error Rate* (PER), est destinée à d'éventuelles retransmissions, augmentant la fiabilité du réseau. Les travaux décrits dans [Zhang and Dolmans, 2009] proposent un protocole MAC permettant de différencier le trafic d'applications médicales critiques de celui d'autres applications (streaming audio, par exemple) en insérant deux périodes de contrôle différentes pour des allocations de ressources distinctes. HMAC [Li and Tan, 2010], pour *Heartbeat-driven Medium Access Control*, propose une synchronisation originale basée sur la captation des battements naturels du cœur, évitant ainsi l'énergie dépensée par des mécanismes de synchronisation radio. Ce protocole est néanmoins limité par les variations du rythme cardiaque et la mise en place de capteurs spécifiques.

D'autres protocoles, visant notamment le délai d'acheminement et la fiabilité, ne se limitent pas à une topologie en étoile, mais étendent celle-ci en proposant de mettre en œuvre un relaiage des données. Ceci va dans le sens d'une meilleure appréhension des particularités des canaux exposées dans la section précédente. CICADA [Latre et al., 2007] est un protocole mixte entre réseau et MAC, fonctionnant de manière synchrone, consistant lors de chaque cycle à construire un arbre du réseau de façon dynamique puis à remonter les informations depuis le niveau le plus éloigné de la source en agrégeant les données à chaque étape. Cette approche, multi-sauts, vise à réduire les délais d'acheminement des données. Dans [Maman et al., 2009], les auteurs évaluent les performances d'un protocole TDMA en simulation, utilisant un modèle du masquage dont les variations temporelles suivent le mouvement et sont spatialement corrélées. Des déconnexions non négligeables sont mises en évidence entre le coordinateur et certains nœuds, montrant le besoin d'approches coopératives pour améliorer la fiabilité des liens. Un exemple de réalisation est donné par [Hara et al., 2011], dans lequel l'initialisation du réseau est réalisée par l'envoi d'un flot de balises, après lequel les nœuds font le choix de relais statiques en fonction des statistiques de réception de ces balises. Dans une autre optique, le protocole BATMAC [Maman and Ouvry, 2011] met en place une stratégie de relaiage des balises et des données adaptative aux conditions dynamiques du masquage. Les auteurs décrivent également une amélioration du protocole par une méthode de prédiction des canaux basée sur des statistiques de réception. Ces méthodes, bien que légèrement plus consommatrices en énergie du fait de l'utilisation plus importante des radios que les transmissions directes, présentent un gain en fiabilité considérable.

2.3. Réseaux de capteurs autour du corps humain



(a) Super-frame du protocole MAC de la norme IEEE 802.15.4, avec balise. B: Beacon (balise), GTS: Guaranteed Time Slot (accès garanti).



(b) Super-frame du protocole MAC de la norme IEEE 802.15.6, avec balise [Kwak et al., 2010]. B: Beacon (balise) EAP: Exclusive Access Phase (haute priorité), RAP: Random Access Phase (accès aléatoire), CAP: Contention Access Phase (activé par une seconde balise B2). Les phases de type I/II sont réservées à des accès particuliers (accès réservé ou trafic à la demande).

Dans un souci de grande flexibilité vis à vis de l'ensemble des requêtes applicatives, la couche MAC de la norme IEEE 802.15.6 [IEEE, 2012] datant de 2012 prend en compte de nombreux critères. Elle permet une topologie mixte étoile/maillage étendue à deux sauts, autorisant des méthodes de relayage, assure les différents types de trafic, et peut prendre en compte des mécanismes permettant la coexistence de plusieurs BAN. La structure de super-frame, illustrée par la figure 2.3b, est différente de celle du 802.15.4, avec des accès réservés pour les paquets à haute priorité, d'autres accès par contention et des accès garantis. Trois modes sont possibles: super-frame avec balise, super-frame sans balise (accès réservé ou par contention) et accès sans balise ni super-frame (discussions individuelles entre le coordinateur et les nœuds selon les besoins). Un ensemble plus récent de méthodes à explorer dans la conception de MAC pour les BAN est donné dans [Boulis et al., 2012], où les auteurs proposent diverses manières d'améliorer la fiabilité et l'efficacité de la couche MAC IEEE 802.15.6. Quatre pistes sont mises en évidence: l'allocation dynamique des ressources, la programmation des retransmissions, l'utilisation de relais et le contrôle de la puissance d'émission. Plus récemment, les travaux de [Dong and Smith, 2014] s'intéressent à la gestion conjointe et dynamique du choix des relais et de l'adaptation de la puissance d'émission. La norme IEEE 802.15.6, définit une couche MAC généraliste, mais la liberté est laissée aux concepteurs d'implémenter les améliorations qu'ils souhaitent en fonction de leurs objectifs et des scénarios d'application. Un problème abordé plus récemment est celui de la coexistence de plusieurs BANs, comprenant la gestion des interférences [Nhan et al., 2014] et la coopération possible entre ces réseaux [Maman et al., 2014].

2.3.5 Applications sportives

Depuis quelques années, certains travaux autour des BAN ont commencé à conquérir d'autres domaines que celui de la surveillance médicale, notamment celui du sport. On peut en effet imaginer l'intérêt pour les équipes sportives, les sportifs professionnels ou amateurs, de pouvoir connaître et améliorer en temps réel leurs performances, leur comportement dans l'effort (mouvement, frappe de la balle, démarche...). Les connaissances apportées par un BAN peuvent également être rendues publiques et intégrées sur un second écran lors des retransmissions télévisuelles, en complément au son et à la vidéo. Quelques exemples de BAN individuels utilisés dans un contexte sportif mettent en évidence les particularités de ce domaine et les méthodes mises en œuvre pour la collecte d'informations. Nous complétons cette synthèse dans la section 5.5, où nous nous intéressons davantage aux communications coopératives dans les groupes denses et mobiles, et au cas particulier du cyclisme.

Dès 2004, une plateforme pour le suivi d'un skieur de fond est proposée par [Hallberg et al., 2004]. Les informations de rythme cardiaque et de positionnement GPS sont collectées via un réseau Bluetooth vers un téléphone mobile puis retransmises par paquets GPRS pour leur intégration dans une interface accessible aux utilisateurs. Cet article fournit une preuve de la faisabilité du système et une analyse qualitative de l'intérêt pour l'utilisateur, tout en soulevant le problème du passage à l'échelle d'un groupe. Un grand intérêt pour le sport est apporté par les capteurs inertiels (accéléromètre, magnétomètre, gyroscope) pour l'analyse du mouvement [Gouwanda and Senanayake, 2008] en conditions sportives réelles (extérieur, mobilité). Deux systèmes à base de capteurs inertiels pour la collecte de données au niveau personnel sont proposés par [Jensen et al., 2012] et [Kugler et al., 2011]. Dans les deux cas la collecte est effectuée par un smartphone via un réseau Bluetooth. Le premier système vise à fournir un retour instantané sur la qualité des mouvements de putt lors des entraînements de golf, le second est un système collectant les données d'une centrale inertielle associées à la position GPS pour la course en extérieur. Ces systèmes ont pour objectif le *coaching individuel*.

Lors de l'expérience du Marathon des Sables [Chelius et al., 2011], les auteurs proposent d'embarquer un BAN destiné lui aussi à l'analyse de mouvement par capteurs inertiels, durant plusieurs jours dans des conditions climatiques extrêmes. Des capteurs de pression sont également insérés dans les chaussures, permettant l'analyse des points de contact du pied. La mise en place du réseau sert ici uniquement à synchroniser les enregistrements de chaque capteur sur des cartes SD embarquées, le coureur devant minimiser son équipement. De nombreux aspects pratiques inhérents à la mesure en extérieur sur de longues durées pour des sports de haut niveau sont mis en évidence. Les travaux de [Akram et al., 2013] visent quant à eux un suivi de la fatigue musculaire de joueurs de football en temps réel, au moyen de capteurs d'acide lactique. Le schéma de communication est limité à un saut, afin de limiter les délais

2.4. Plateforme mise en œuvre pour la collecte de données en contexte sportif

de transmission, les nœuds communiquant directement avec 6 points d'accès répartis autour du terrain. Les auteurs présentent ici l'exemple d'une application pour le sport avec transmission d'alertes, dès lors que le paramètre mesuré dépasse un certain seuil. On peut toutefois émettre quelques réserves quant à une réalisation pratique, malgré l'intérêt du paramètre relevé, notamment à cause de l'introduction de capteurs invasifs (aiguilles) sur les joueurs. Une étude visant la collecte de données cardiaques de marathoniens est présentée dans [Benferhat et al., 2012]. La plateforme consiste en une communication par Bluetooth entre le capteur de pulsation cardiaque et un smartphone, qui retransmet les données collectées par Wifi à des points d'accès disséminés de façon éparse le long du trajet. Les auteurs font le choix d'un réseau tolérant aux délais, du fait des connexions non permanentes avec les points d'accès.

Ces exemples montrent qu'il est possible de mettre en place des réseaux de type BAN individuels permettant le suivi d'événements sportifs, aussi bien pour un usage privé que pour la mise à disposition de contenu au public. Dans la plupart des cas, si les capteurs communiquent au moyen de technologies à basse consommation (Bluetooth, 802.15.4), l'interfaçage avec l'extérieur (niveau extra-BAN) est réalisé au moyen d'un smartphone, ou de points d'accès fixes. Toutefois, en milieu sportif professionnel et en situation de mobilité, l'équipement embarqué sur la personne doit être d'un poids et d'un encombrement minimaux (quelques grammes par capteur), ce qui rend difficile l'utilisation du smartphone. De plus, si une approche tolérante aux délais ou de faibles débits peuvent être satisfaisants pour des applications sociales, un grand intérêt peut être apporté par un suivi en continu à faible latence de certains individus. Ceci nécessite des puits mobiles et des canaux dédiés assurant un débit constant et une connectivité permanente avec l'événement suivi.

2.4 Plateforme mise en œuvre pour la collecte de données en contexte sportif

Les travaux de cette thèse sont réalisés en partenariat avec les sociétés Euromedia France [eur, 2014], leader dans la retransmission télévisuelle d'événements sportifs (Marathon de Paris, Tour de France, football, Jeux Olympiques...), et HiKoB [hik, 2014c], startup créée en 2011, issue d'un transfert de technologie du laboratoire CITI et d'INRIA vers l'industrie, spécialisée dans l'instrumentation sans fil. Ils ont pour objectifs principaux l'exploration des communications en contexte sportif mobile et la conception de plateformes de collecte de données puisées en temps réel au cœur de l'événement. En effet, le spectateur étant toujours en quête de nouvelles informations, il est d'un intérêt majeur de proposer des solutions innovantes permettant à la fois un suivi global et personnalisé, en direct, du déroulement de l'épreuve. Comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, ces nouvelles fonctionnalités sont rendues possibles grâce

aux réseaux BAN, qui permettent la captation de nombreux paramètres sur les sportifs de manière non invasive, sans gêner leurs mouvements.

Nous présentons ici l'architecture générale du réseau mis en place lors des différentes expérimentations en conditions réelles réalisées au cours des travaux de thèse, constituée d'un réseau BAN embarqué sur les sportifs et d'une infrastructure de collecte permettant la centralisation des données. Nous fournissons également le détail des nœuds de communication embarqués sur les sportifs et sur les puits mobiles.

2.4.1 Architecture générale

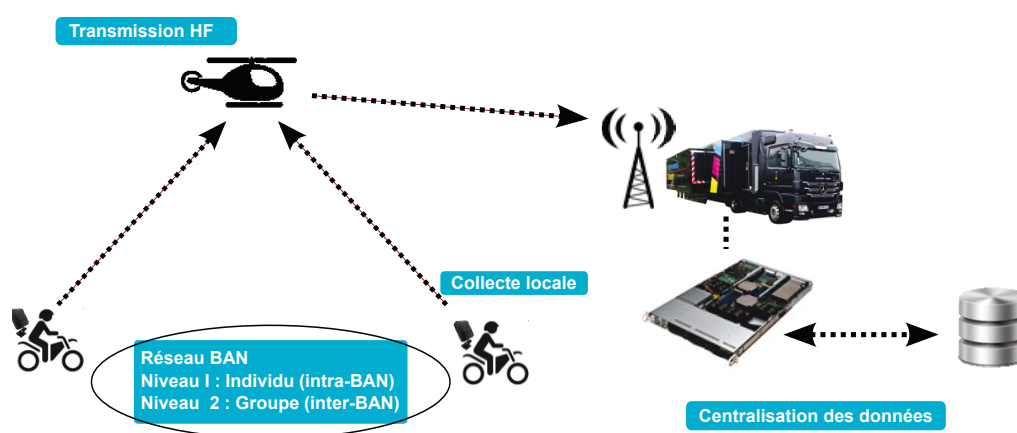


Figure 2.4 – Architecture générale pour la collecte d'informations en contexte de diffusion d'événement sportif. Selon l'application visée, la nature du réseau BAN et le nombre de puits mobiles peuvent évoluer, l'infrastructure de collecte restant identique.

Les applications visées sont la collecte d'informations sur le comportement des individus et sur l'événement de façon générale, lors de la retransmission de courses ayant lieu sur de longues distances (Marathon, Tour de France). Nous souhaitons récupérer les informations en temps réel sur toute la durée de retransmission, de ce fait une forte contrainte de latence nous est imposée, car les informations apportées par le réseau BAN doivent être en phase avec la retransmission des signaux audio et vidéo. Pour répondre à ces attentes, l'infrastructure illustrée par la figure 2.4, a été mise au point, et utilisée lors de chaque expérimentation en contexte de diffusion télévisuelle. Elle est constituée de quatre niveaux:

- *un réseau BAN*, qui selon l'application visée, possède un ou deux niveaux de liaison: communication directe avec les puits, communication entre les individus.

2.4. Plateforme mise en œuvre pour la collecte de données en contexte sportif

Les nœuds embarqués sur les sportifs sont des capteurs HiKoB Fox [hik, 2014a], dont nous donnons le détail dans la section suivante.

- *un réseau de collecte locale*, constitué d'un ou plusieurs puits mobiles (selon le contexte) situés sur des motos encadrant la course (également en charge du captage audio et vidéo). Des routeurs HiKoB Lion [hik, 2014b] sont en charge de la récupération des données issues du réseau BAN et de leur évacuation vers le point de collecte central via le lien de transmission HF.
- *un réseau de collecte globale*, modélisé par le lien HF. L'ensemble des données prises par les motos (audio, vidéo, réseau BAN) sont multiplexées et transitent par ce lien, via un éventuel relais aérien (hélicoptère, avion) vers le point de collecte central situé au niveau du car régie.
- *une infrastructure de centralisation*, où est finalisée la collecte des données, rendant possible leur intégration dans un contenu multimédia (incrustation à la vidéo, application smartphone, base de données etc.).

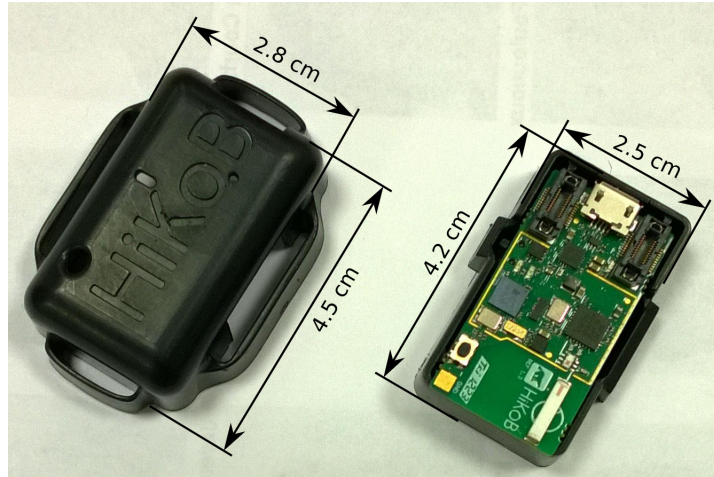
Cette infrastructure permet, par la proximité entre les puits et les nœuds, des communications à faible portée (quelques dizaines de mètres), donc une consommation énergétique et un rayonnement électromagnétique limités du réseau BAN. Du fait du suivi permanent par les puits et du canal de transmission HF dédié, les éventuels problèmes liés à l'utilisation d'autres réseaux (débit, délai, couverture, déconnexions...) peuvent également être évités.

2.4.2 Systèmes HiKoB

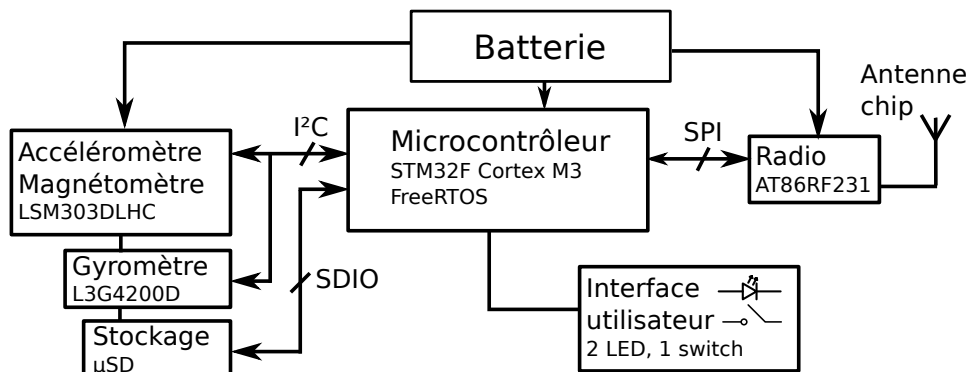
La société HiKoB est née en 2011 d'un transfert de technologies du laboratoire CITI et d'INRIA, et a pour spécialité le développement matériel et logiciel de systèmes d'instrumentation sans fils, dans plusieurs domaines. Très impliqués à la fois dans des projets de simulation pour les réseaux de capteurs, comme WorldSens [Fournel et al., 2007], les créateurs d'HiKoB bénéficient également d'une grande expérience pratique, par des projets comme Senslab [Burin des Roziers et al., 2011], conception d'une plate-forme hétérogène complète pour le développement et la validation de réseaux de capteurs sans fils à large échelle. La conception de capteurs embarqués et connectés, répondant aux nombreuses contraintes du sport de haut niveau (ergonomie, solidité, conditions extrêmes d'utilisation, durée d'utilisation, fréquence d'échantillonnage ...) est également un point clé de la technologie HiKoB, illustré notamment par l'expérience du Marathon des Sables [Chelius et al., 2011]. Par rapport aux systèmes existants, les nœuds développés pour cet expérience présentent l'originalité d'être physiquement extensibles en termes de mesures, complètement connectés et synchronisés, et adaptés aux contraintes motivant ce projet. Le système

BAN utilisé lors de l'expérience du Marathon des Sables est à l'origine du nœud Fox, que nous présentons ci-après.

Capteurs embarqués



(a) Photo d'un Capteur Fox avec boîtier, illustrant le facteur de forme du système.



(b) Architecture simplifiée du capteur Fox.

Figure 2.5 – Illustration du capteur Fox et de son architecture simplifiée.

Les nœuds embarqués sur les sportifs sont des capteurs HiKoB Fox [hik, 2014a]. Ils sont alimentés par une batterie (3.7 V, 220 mAh) et équipés d'un microcontrôleur d'architecture ARM Cortex-M3 32 bits [stm, 2014a], possédant 512 kbits de mémoire Flash et 64 kbits de RAM. Les capteurs Fox possèdent les éléments de mesure inertiels MEMS suivants:

- un accéléromètre 3D [lsm, 2014] d'amplitude réglable, de $\pm 2g$ à $\pm 16g$, 16 bits de

2.4. Plateforme mise en œuvre pour la collecte de données en contexte sportif

précision.

- un magnétomètre 3D intégré au même composant [lsm, 2014], d'amplitude ± 1.3 à ± 8.1 gauss, 16 bits de précision.
- un gyromètre 3D [lg, 2014] d'amplitude réglable entre 250 et 2000 degrés par seconde, 16 bits de précision.

Il est également possible d'équiper les nœuds Fox d'une puce GPS Ublox MAX 6 [ubl, 2014a] au moyen d'une carte fille. Pour le stockage externe d'importants volumes de données, les capteurs Fox sont équipés d'un lecteur de carte micro SD, utilisant le système de fichier FAT32. Les timers utilisés pour les mesures temporelles dans le cadre des applications développées fonctionnent à une fréquence de 32.768 kHz, donnant une résolution temporelle d'environ $30.5 \mu s$, ce qui est proche de la durée de transmission d'un octet par la radio. Les communications radio s'effectuent au moyen de la radio Atmel AT86RF231 [atm, 2012], dont nous décrivons les caractéristiques en section 2.4.3, reliée à une antenne chip intégrée au PCB. Une interface réduite à un bouton poussoir et deux LED permet de déclencher des actions simples (écriture sur la carte SD par un appui sur le bouton, par exemple) et un contrôle visuel minimal de l'application implémentée. L'architecture simplifiée du capteur Fox est présentée en figure 2.5b.

Dans le cadre des expérimentations en contexte sportif, les capteurs Fox sont intégrés dans un boîtier pouvant être aisément mis en place par des attaches appropriées. La photo présentée en figure 2.5a présente le capteur Fox avec son boîtier, illustrant le facteur de forme du système embarqué sur le sportif. L'ensemble (capteur + batterie + boîtier) est peu encombrant et pèse une vingtaine de grammes, ce qui est tout à fait tolérable pour des sportifs amateurs ou professionnels.

Puits mobiles

Les puits mobiles embarqués sur les motos sont des systèmes HiKoB Lion [hik, 2014b]. Contrairement aux Fox, ceux-ci sont directement alimentés par la moto, ils ne sont donc pas soumis à des contraintes de consommation énergétique. Ils possèdent le même composant radio Atmel que les Fox, mais sont quant à eux connectés à une antenne à fort gain dans la bande 2.4GHz, fixée sur le mât d'antenne de la moto. Les routeurs Lion sont équipés d'un microcontrôleur de même architecture que les Fox, possédant 128 kbits de mémoire Flash et 10 kbits de RAM [stm, 2014b].

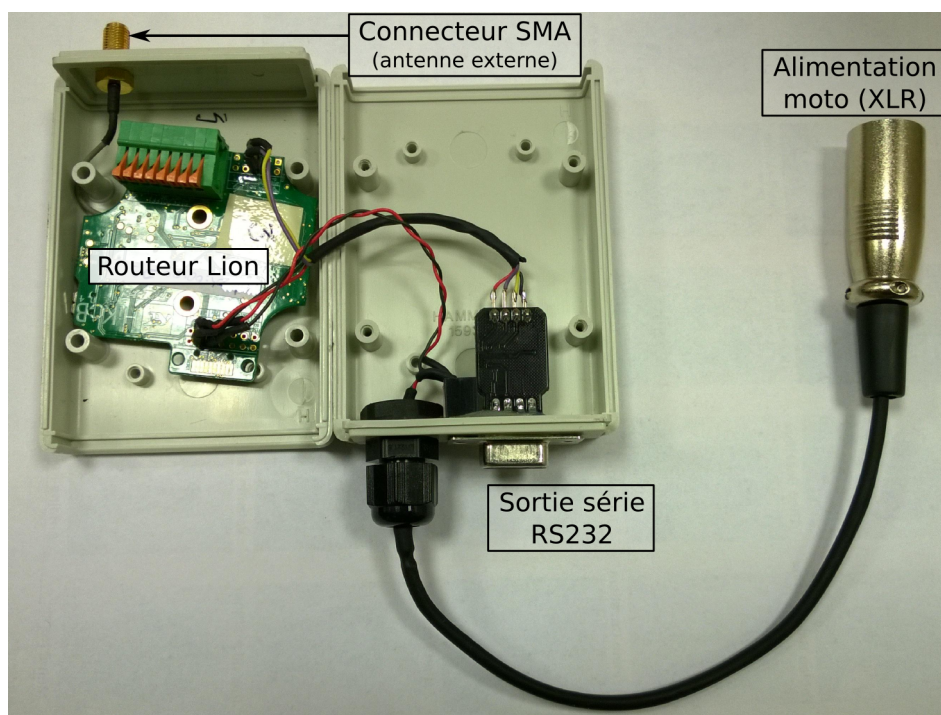


Figure 2.6 – Photo d'un routeur Lion dans son boîtier, tel qu'embarqué dans les motos, avec la connectique permettant de s'interfacer avec le système Euromedia.

Lien série

Comme nous l'avons expliqué précédemment, les routeurs Lion sont chargés de faire l'interface entre le réseau de capteurs BAN et le lien de transmission HF Euromedia. Les données à envoyer via le lien HF sont transmises par le microcontrôleur au système Euromedia via une UART sous la forme d'un flux série standard RS232 à 9600 bits/s. Ce flux de données est ensuite multiplexé avec les flux audio et vidéo, transmis via le lien HF, et récupéré en flux série RS232 sur un poste distant situé dans le car régie. La photo donnée en figure 2.6 présente un routeur Lion dans son boîtier, tel qu'embarqué sur les motos, avec la connectique permettant de s'interfacer avec le système Euromedia.

2.4.3 Communication radio

Les communications radio entre les systèmes HiKoB Fox et Lion sont effectuées grâce au système Atmel AT86RF231 [atm, 2012]. Cette radio implémente la couche physique de la norme IEEE 802.15.4, définie pour les réseaux de capteurs sans fils. Les communications utilisent la bande ISM comprise entre 2.4 GHz et 2.5 GHz, au sein de laquelle 16 canaux en bande étroite sont disponibles. Les signaux sont modulés en O-QPSK (pour *Offset quadrature phase-shift keying*), avec étalement de spectre (DSSS, *Direct*

2.4. Plateforme mise en œuvre pour la collecte de données en contexte sportif

Sequence Spread Spectrum). Chaque mot de données de 4 bits est converti en une séquence pseudo-aléatoire de 32 bits. Le débit de transmissions des données est de 250 kbps (soit 2 Mbps pour les séquences pseudo-aléatoires), et la radio dispose d'une mesure d'indicateur de puissance reçue, en anglais *Received Signal Strength Indicator* (RSSI). La métrique de la radio que nous utilisons pour estimer la qualité des liens est en réalité Energy Detection (ED), qui consiste en une simple moyenne du RSSI sur les 4 derniers octets de données reçus.

La radio implémente également un code détecteur d'erreur de type CRC16 (*Contrôle de Redondance Cyclique*, sur 16 bits). Le résultat de la division des paquets de données par le polynôme caractéristique du code CRC16, $G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$, sur 2 octets, est ajouté en fin de trame par l'émetteur. Lors du décodage d'un paquet par le récepteur, la radio recalcule cette valeur, qui doit être identique à celle de l'émetteur. Dans le cas contraire, le paquet reçu, erroné, est perdu, et l'erreur de décodage est propagée aux couches supérieures du réseau. Pour un tel codage, la probabilité p_{fp} de faux positif (paquet erroné donnant la même valeur de CRC que le paquet original) s'approche de $p_{fp} = \frac{1}{2^{16}}$. L'ensemble des caractéristiques de la radio est résumé dans le tableau 2.2.

Débit	250kbps
Modulation	Offset-QPSK avec étalement de spectre (DSSS)
Plage de fréquence	2408-2480 MHz
Nombre de canaux	16
Espace inter-canaux	5 MHz
Puissance d'émission P_{TX}	[-17;+3] dBm (2 mW)
Tolérance sur P_{TX}	± 3 dB
Sensibilité	-101 dBm à 250 kbps
Plage de la détection d'énergie (ED)	[-91;-8] dBm ± 1 dB
Détection d'erreur	CRC16
Antenne	Chip (intégrée au PCB)

Table 2.2 – Caractéristiques principales de la radio Atmel AT86RF231.

Structure des paquets radio

Comme nous l'avons expliqué, la radio Atmel implémente la partie physique de la norme IEEE 802.15.4 ; la couche MAC sera définie au niveau du logiciel embarqué sur le microcontrôleur. Nous définissons ici la structure des paquets radio au niveau de la couche PHY, les couches supérieures, dépendantes de l'application, seront décrites dans les chapitres correspondants.

Le format de trame de la couche PHY (PPDU, pour *PHY Protocol layer Data Unit*), tel qu'illustré par la figure 2.7, se compose des éléments suivants:

- Une entête de synchronisation (SHR, pour *Synchronization Header*), composée

d'un préambule de 4 octets à 0 et d'un octet de début de trame (SFD, *Start Frame Delimiter*), à la valeur hexadécimale 0xA7.

- Un octet d'entête PHY (PHR, *Phy Header*), indiquant la taille en octets des données transmises par la couche MAC.
- L'unité de données de la couche MAC (MPDU, pour *MAC Protocol Data Unit*), de taille variable, limitée à 127 octets, et terminée par 2 octets destinés au contrôle d'erreur implémenté par le CRC16 (FCS, pour *Frame Check Sequence*).

Ainsi s'ajoutent aux données MAC un total de 8 octets, correspondant à une durée de transmission de 250 μ s.

				2 octets (CRC)
Préambule	SFD	PHR	Données MAC	FCS
5 octets, entête de synchronisation (SHR)		1 octet (taille)	Mac Protocol Data Unit (MPDU), 127 octets max	
Phy Protocol Data Unit (PPDU)				

Figure 2.7 – Format de trame de la couche physique implémentée par la radio Atmel, conforme à la norme IEEE 802.15.4, extrait de [atm, 2012].

2.4.4 Architecture logicielle

La programmation des systèmes HiKoB est réalisée au moyen d'une carte fille JTAG via OpenOCD [ope, 2014] ; le code permettant le développement d'applications pour les nœuds Fox et les routeurs Lion est écrit en langage C, compilé par ARM-GCC [arm, 2014]. Le système d'exploitation FreeRTOS [fre, 2014] fournit une interface de programmation permettant de définir et d'ordonnancer, selon les priorités définies par l'utilisateur, différentes tâches applicatives, telles que la mesure cadencée des capteurs inertiels, les communications avec la radio, l'écriture sur la carte SD... Il s'agit d'un système d'exploitation léger, préemptif et Open source destiné aux microcontrôleurs, très utilisé dans les applications de réseaux de capteurs sans fils. L'ensemble de l'architecture logicielle permettant le pilotage des différents éléments des plateformes Lion et Fox (microcontrôleur, radio, capteurs...), l'écriture sur la carte SD, ainsi que certaines méthodes de traitement de signal, est fourni par la société HiKoB. L'essentiel des développements pratiques présentés dans cette thèse se situe au niveau MAC et applicatif.

3 Preuve de concept : Marathon de Paris 2012

Sommaire

3.1	Introduction	30
3.2	Contexte applicatif	31
3.2.1	Equipement proposé	32
3.3	Informations collectées par les capteurs	33
3.3.1	Données issues des accéléromètres	33
3.3.2	Données issues des semelles	34
3.3.3	Données issues du GPS	35
3.4	Mise en place du réseau	35
3.4.1	Topologie du réseau BAN	35
3.4.2	Protocole de communication	36
3.5	Expérimentation	39
3.5.1	Déroulement de la course	39
3.5.2	Données collectées	40
3.6	Analyse des résultats	40
3.6.1	Estimations générales	41
3.6.2	Analyse des pertes	42

3.6.3 Analyse des liens	44
3.7 Conclusion et perspectives	50

3.1 Introduction

L'expérimentation présentée dans ce chapitre a pour objectifs l'intégration et la validation d'un réseau BAN individuel au sein de la structure de retransmission télévisuelle d'événements sportifs présentée dans la section 2.4.1 du chapitre précédent. L'événement pour lequel notre architecture a été conçue est en l'occurrence le Marathon de Paris, qui a eu lieu le 15 avril 2012 [mar, 2014]. A la différence d'expériences déjà menées sur ce type d'événement [Benferhat et al., 2012, Pfisterer et al., 2006] visant une collecte de données à large échelle mais faible débit, ou tolérante aux délais, nous adoptons une approche «online», en adéquation avec les contraintes de la retransmission télévisuelle.

En d'autres termes, la plateforme réalisée doit être capable de collecter un ensemble d'informations sur le comportement d'un coureur à une fréquence élevée, sans interruption, pouvant être intégrées en direct au flux vidéo. Une telle approche peut être envisagée en d'un point de vue large échelle et grand public, qui présente une portée sociale intéressante, mais également en visant un suivi continu des performances de petits groupes de sportifs professionnels en tête de course. Ce chapitre présente une preuve de concept de ce type d'application pour un seul athlète, pour laquelle nous avons mis au point l'ensemble du processus d'acquisition, incluant l'intégration des mesures issues de différents capteurs situés sur l'athlète, ainsi qu'un protocole simple de communication adapté aux contraintes applicatives. De plus, grâce aux données collectées, nous avons pu caractériser les performances des communications sur les différents liens radio mis en jeu et fournir une première analyse des canaux dans ce type d'environnement.

Après une description du contexte applicatif et des contraintes inhérentes à celui-ci en section 3.2, nous présentons de manière détaillée les informations collectées par les capteurs dans la section 3.3. Le réseau conçu pour l'expérimentation ainsi que le protocole de communication sont décrits en section 3.4. La section 3.5 explique le déroulement de l'événement ainsi que les données collectées, l'analyse des performances de communication et des canaux étant décrite dans la section 3.6. Enfin, les conclusions et pistes de travail à envisager par la suite sont données en section 3.7.

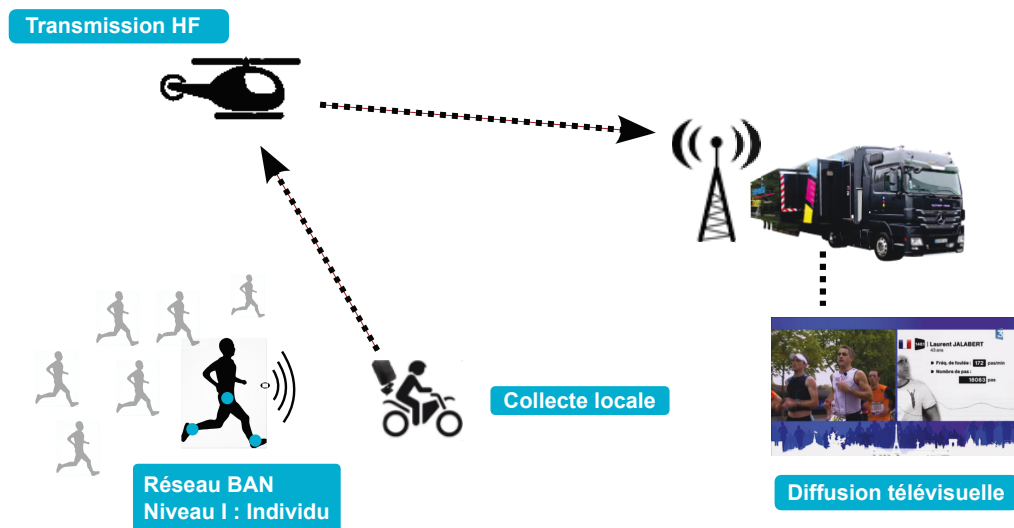


Figure 3.1 – Infrastructure destinée à la collecte de données sur un coureur lors du Marathon de Paris 2012. Un seul individu est équipé de trois capteurs, une moto le devant et assure la collecte locale des données, qui sont ensuite acheminées jusqu'à l'incrustation TV.

3.2 Contexte applicatif

Le réseau BAN mis en œuvre doit être capable de collecter des informations synthétiques sur le comportement du coureur durant la course, à savoir :

- l'intensité des chocs reçus au niveau des chevilles (en g)
- la fréquence de foulée (pas/minute)
- le temps de vol, c'est-à-dire la durée, lors de chaque foulée, durant laquelle les deux pieds ne sont pas en contact avec le sol (en ms)
- le nombre total de pas effectués depuis le début de la course
- la vitesse du coureur (en km/h)
- la position géographique du coureur (latitude, longitude)
- une indication de la fatigue du coureur

L'ensemble des informations doit être transmis de façon périodique et mis à jour à une fréquence $F = 25$ Hz, soit une période $T = 40$ ms. La contrainte de latence, entre la

production d'un événement et sa retransmission, jugée tolérable par les professionnels se situe autour de 100 ms.

Le Marathon de Paris est une épreuve sportive pouvant accueillir jusqu'à 50000 participants, ce qui en terme de densité s'avère considérable. Afin de pouvoir suivre dans de bonnes conditions les performances du coureur équipé, nous proposons l'infrastructure décrite en figure 3.1, qui est un cas spécifique de l'architecture générale décrite dans le chapitre précédent (section 2.4.1). Une moto équipée d'un routeur en charge de la centralisation locale des données devance le coureur équipé et reste à proximité de celui-ci durant toute la durée de la course, afin de maintenir la connexion du réseau BAN. Les données sont ensuite transmises via le lien série jusqu'au car régie, où l'on peut procéder à une incrustation en direct de celles-ci. Nous décrivons dans les sections suivantes l'équipement proposé pour l'acquisition des informations et le protocole de communication implémenté.

3.2.1 Equipement proposé

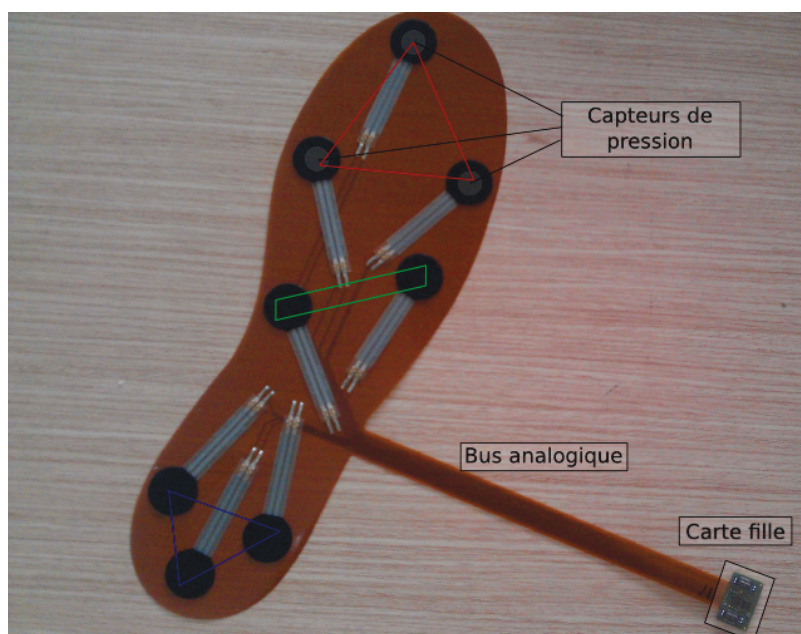


Figure 3.2 – Photo d'une semelle souple équipée de capteurs FSR et d'une carte fille destinée à la connexion au nœud Fox. Les trois zones retenues pour la mesure sont indiquées en rouge, vert et bleu.

Afin de caractériser le comportement du coureur durant le Marathon, nous proposons de l'équiper de trois nœuds HiKoB Fox [hik, 2014a], dont nous exploitons les capteurs intégrés, et auxquels nous ajoutons des éléments de mesure supplémentaires. Un nœud Fox est fixé à chaque cheville, auquel est physiquement connectée une

semelle souple équipée de huit points de mesure de pression. Il s'agit de jauges de contrainte, en anglais *Force Sensitive Resistance* (FSR), dont la résistance varie en fonction de la pression exercée. Les capteurs FSR sont connectés via un bus souple et une carte fille équipée d'un multiplexeur, à des entrées de conversion analogique-numérique du microcontrôleur.

L'ensemble constitué par le nœud Fox et la semelle permet de récupérer des informations sur le mouvement des pieds et des jambes (chocs, temps de vol, nombre de pas, fréquence de foulée), que nous détaillons ci-après. Les semelles souples, dont une photo est donnée en figure 3.2, d'une épaisseur de quelques millimètres, sont insérées dans la chaussure, entre la semelle intérieure et la semelle intermédiaire, elles sont conçues pour ne pas gêner le confort du coureur.

Un troisième nœud Fox est fixé au niveau de la hanche. Il est quant à lui équipé d'une carte fille GPS, afin de récupérer les informations de position et de vitesse du coureur, ainsi qu'une indication sur son état de fatigue. Le schéma d'ensemble de l'équipement du coureur et des données collectées est donné par la figure 3.3.

3.3 Informations collectées par les capteurs

Nous présentons dans cette section le détail des mesures et traitements effectués par les capteurs. Ceux-ci ayant la capacité d'implémenter des méthodes de traitement de signal, le choix est fait de les mettre à profit afin de ne transmettre que des données très synthétiques au routeur, pouvant être lues et interprétées directement. La transmission de données brutes permettrait une plus grande flexibilité sur les traitements à la réception, mais les déconnexions seraient plus difficiles à gérer (interpolations, erreurs...).

3.3.1 Données issues des accéléromètres

Les valeurs accélérométriques sont acquises périodiquement à une fréquence $F_{acc} = 50$ Hz.

Chocs

L'amplitude des chocs subis au niveau des chevilles et son évolution est une information intéressante, elle peut notamment permettre de contribuer à déterminer l'état de fatigue du coureur. La mesure des chocs est effectuée au moyen des accéléromètres embarqués sur les nœuds Fox, il s'agit de l'amplitude maximale de la norme de l'accélération au cours des N dernières acquisitions, soit: $c = \max(|A(n)|, \dots, |A(n -$

$N + 1$)), avec $|A(n)| = \sqrt{a_x^2(n) + a_y^2(n) + a_z^2(n)}$. Dans notre cas, le maximum est effectué sur $N = 25$ échantillons. La mise à jour de cette information est donc réalisée à une fréquence de 2 Hz. Nous transmettons également la valeur absolue de l'accélération verticale brute à 25 Hz, moyenne de deux échantillons acquis à 50 Hz.

Fréquence de foulée

La fréquence de foulée, pour être fiable compte tenu des fortes variations des valeurs acquises par les accéléromètres, nécessite d'être calculée au moyen d'un algorithme de transformée de Fourier rapide, en anglais *Fast Fourier Transform* (FFT) [Sorensen et al., 1987]. L'algorithme de FFT est fourni par HiKoB. L'information est rafraîchie à une fréquence $F_{FFT} = 5$ Hz, sur les 128 dernières valeurs de la composante verticale de l'accélération. La fréquence de foulée est ensuite obtenue en recherchant les composantes les plus élevées du spectre obtenu et en discriminant la fondamentale des éventuelles harmoniques. Un échantillonnage de la FFT à 5 Hz donne un spectre compris entre 0 et 2.5 Hz, soit une fréquence maximale de 150 foulées/minute (300 pas/minute), ce qui est bien supérieur à une foulée de marathonien, située autour de 180 pas/minute.

3.3.2 Données issues des semelles

Les capteurs FSR donnent des informations qualitatives sur la pression exercée au niveau de la plante du pied. Les valeurs de ces capteurs sont également acquises périodiquement à une fréquence $F_{fsr} = 50$ Hz.

Données brutes

Nous décidons de réduire les données acquises par les FSR aux trois zones principales du pied: avant, milieu, arrière. Pour cela, une moyenne est effectuée entre les trois points de mesure situés à l'avant du pied, les deux points situés dans le milieu du pied et les trois points situés au niveau du talon, comme indiqué sur la figure 3.2.

Temps de vol et nombre de pas

Le temps de vol est défini par la durée durant laquelle les deux pieds ne sont pas en contact avec le sol. Il ne peut donc être calculé indépendamment sur chaque pied. Les données fournies par les capteurs FSR permettent de déterminer l'état de contact du pied avec le sol, par seuillage. Si les trois valeurs sont élevées, le pied est considéré en contact, et inversement. Les deux derniers états (du fait de l'acquisition à 50 Hz) sont transmis par les deux nœuds Fox des chevilles au routeur, qui en déduit le temps de

vol, avec une résolution temporelle de 20 ms. Le nombre de pas total est également déduit des informations d'état de contact du pied.

3.3.3 Données issues du GPS

Les données issues du GPS sont une lecture directe des trames d'informations fournies par la puce GPS Ublox [ubl, 2014a]. Elles sont acquises à la fréquence maximale de 0.5 Hz. Les données retenues sont la latitude, la longitude et la norme de la vitesse. Un indice de fatigue est également calculé, basé sur les variations de la vitesse (irrégularité à court terme, baisse de vitesse à long terme).

3.4 Mise en place du réseau

3.4.1 Topologie du réseau BAN

Du fait des conditions particulières d'un tel événement, de la diffusion des mesures en direct, il est nécessaire de pallier l'éventualité des déconnexions, pour diverses raisons, d'un ou plusieurs nœuds. On souhaite notamment éviter le cas où la mort prématurée d'un nœud centralisateur, situé sur le BAN, entraînerait la perte des autres. De ce fait, compte tenu de la moto située à proximité du coureur, on peut considérer que la structure la plus simple est une communication indépendante des nœuds du BAN avec le routeur. Nous adoptons donc une topologie en étoile des nœuds vers le puits, illustrée par la figure 3.3.

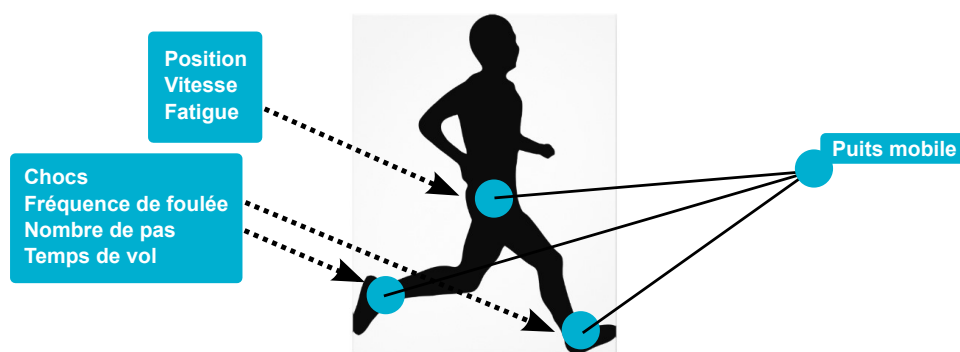


Figure 3.3 – Illustration du réseau BAN proposé, indiquant les données collectées, le placement des nœuds et la topologie du réseau.

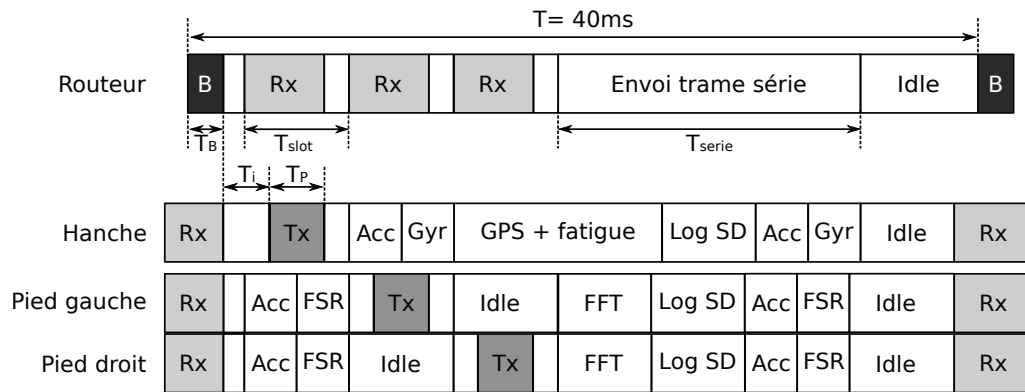


Figure 3.4 – Illustration du protocole TDMA mis au point pour la collecte des données, ainsi que la séquence d’acquisition des différents capteurs. Les durées caractéristiques du protocole radio sont mises en évidence et détaillées dans le tableau 3.1.

Durée de transmission de la balise	T_B	0.512 ms
Durée de transmission d’un paquet radio	T_P	1.856 (hanche)/1.376 (pieds) ms
Durée intermédiaire	T_i	2.3 ms
Slot paquet radio	T_{slot}	3.0 ms
Durée de transmission trame série	T_{serie}	33.3 ms
Acquisition GPS	T_{gps}	15 ms
Calcul de la FFT	T_{fft}	7 ms
Ecriture carte SD	T_w	2.5 ms

Table 3.1 – Tableau récapitulatif des timings définis pour le protocole TDMA, ainsi que les durées les plus significatives liées à l’acquisition et au stockage.

3.4.2 Protocole de communication

Un protocole synchrone

Compte tenu du faible nombre de nœuds, de la topologie retenue, des contraintes de latence et de périodicité des transmissions, nous considérons qu’une approche simple de type TDMA est la mieux appropriée pour les communications entre les nœuds et le puits. L’objectif est double: implémenter un protocole simple, évitant un contrôle complexe, gérant un seul type de trafic (périodique), chaque nœud émettant ses données à la même fréquence (25 Hz), pour répondre aux besoins de l’application, mais aussi récupérer des informations sur les différents liens de façon régulière. Ce type de protocole nécessite l’émission périodique d’une balise (beacon) par le puits, permettant la synchronisation des nœuds. Une fois la balise reçue, chaque nœud émet séquentiellement son paquet d’information durant un slot réservé. Le reste du temps est consacré pour les nœuds à l’acquisition des prochaines données. Quant au puits, il est en charge de la mise en forme des informations reçues et de leur évacuation via le lien série.

Le protocole proposé est illustré par la figure 3.4. Les principaux timings sont mis en évidence. L'ensemble des durées significatives sont récapitulées dans le tableau 3.1. Par souci de simplicité la même durée de slot T_{slot} est attribuée à chaque nœud, incluant le puits. En cas de perte de connexion avec le puits durant plus de trois périodes, les nœuds se placent en écoute permanente et cessent d'émettre jusqu'à la prochaine balise reçue. Dans cette éventualité, l'acquisition des valeurs et l'écriture périodique des données sur la carte SD sont maintenues. Compte tenu de certaines durées d'acquisition non négligeables et des contraintes strictes de l'accès synchrone, un seul fil d'exécution est implémenté sur les nœuds, alternant mesure et transmission.

Saut de fréquence

Une course très médiatisée, en environnement urbain avec de très nombreux concurrents et spectateurs tout le long du parcours présente le risque de nombreuses interférences, particulièrement dans la bande libre autour de 2.4 GHz, qui est également celle des technologies Wifi et Bluetooth. La radio Atmel dispose de 16 canaux (numérotés de 11 à 26) sur l'étendue du spectre de la norme 802.15.4. Afin de limiter le risque de pertes dues aux interférences, nous proposons une méthode permettant la diversification des canaux utilisés pour la communication. Ainsi, selon un schéma rotatif simple dépendant de l'indice de trame courant (indiqué par la balise), chaque nœud émet à tour de rôle sur un canal différent, comme indiqué dans le tableau 3.2. La balise, émise par le puits avec une plus forte puissance, est toujours émise sur le même canal, ce qui permet les reconnections rapides des nœuds (un seul canal à écouter de façon permanente) en cas de perte de contact momentanée.

N. Trame (modulo 3)	0	1	2
	Canal		
Balise	15	15	15
Bassin	12	16	19
Pied gauche	13	17	20
Pied droit	14	18	21

Table 3.2 – Schéma rotatif utilisé pour la méthode de saut de fréquence. Seule la balise est toujours émise sur le même canal.

Codage canal

Comme nous l'avons vu dans la section 2.3.3 du chapitre précédent, les canaux d'un réseau BAN sont soumis à de nombreuses variations dues à l'environnement, au mouvement du corps, entraînant des affaiblissements rapides (fast fading), ou des obstructions plus lentes (shadowing), s'ajoutant à d'éventuelles interférences. Ces deux types de variations peuvent entraîner des déconnexions plus ou moins lentes, dues à une absence de signal dans le cas d'une obstruction par un obstacle, ou à un signal trop faible ou trop bruité pour être correctement décodé. Il existe de nombreuses méthodes

permettant de détecter ou de corriger les erreurs de décodage, en introduisant de la redondance dans le message [Peterson and Weldon, 1972]. Comme expliqué dans la section 2.4.3, les radios Atmel implémentent par défaut une détection d'erreur de type CRC16. Nous ajoutons à cette méthode un simple codage répétitif. Soit $D(n)$ l'ensemble des données des capteurs acquises à la période n . Le paquet $P(n)$ transmis durant la période n est constitué de $D(n)$, $D(n-1)$ et $D(n-2)$. Le puits recevant ces informations retransmet alors les données $D(n-2)$ vers le serveur central et stocke $D(n-1)$ et $D(n)$. A la période $n+1$, si le paquet reçu d'un nœud est erroné, la donnée $D(n-1)$ est normalement déjà en mémoire au niveau du puits et peut être retransmise. Il faut donc une interruption d'au moins trois périodes pour commencer à perdre réellement des données; ce codage très simple permet de réduire fortement les effets des évanouissements rapides, et profite en outre de la méthode de saut de fréquence. La latence globale introduite est de 120 ms, ce qui est correct au vu des spécifications applicatives. La constitution des paquets de données, illustrant également la méthode de codage, est donnée en figure 3.5.

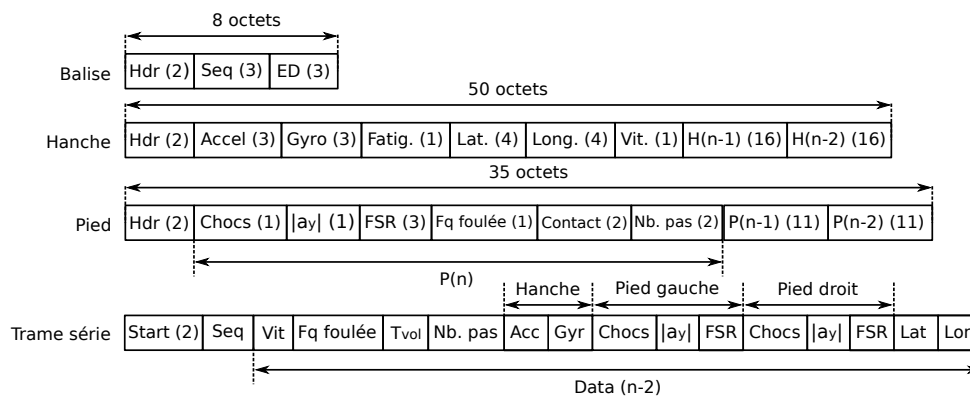


Figure 3.5 – Constitution des paquets radio et de la trame série à la séquence n , illustrant également la méthode de codage répétitif. La taille des données est en octets. Les données d'accéléromètre et de gyroscope de la hanche n'ont pas été utilisées.

Constitution des paquets radio

Les paquets radio sont composés d'une simple en-tête MAC sur 2 octets indiquant le type de paquet (beacon, data), la source et le numéro de trame (ou séquence) en cours. Cette en-tête est suivie des données spécifiques à la source et au type de paquet.

Afin de pouvoir évaluer la qualité des liens entre les nœuds et le puits, la balise inclut dans ses données le numéro de séquence du dernier paquet reçu pour chaque nœud, ainsi que le niveau d'Energy Detection ED associé (on rappelle que l'ED est la métrique donnée par la radio, qui est en réalité une moyenne du RSSI sur les 4 derniers octets de données reçus). Ces informations seront stockées sur les cartes SD

des nœuds , le routeur ne disposant pas d'espace de stockage approprié.

Les paquets de données transmis par les nœuds , comportent l'ensemble des informations issues des capteurs, triplées par la méthode de codage répétitif. Le détail des paquets est donné en figure 3.5. Compte tenu du débit (250 kbit/s), la durée de transmission d'un paquet venant de la hanche est de 1.856 ms, de 1.376 ms pour un paquet venant des chevilles, et de 0.512 ms pour une balise.

Constitution de la trame série

Une fois les informations collectées localement par le puits, celui-ci est chargé de les mettre en forme et de les transmettre via le lien série à 9600 bits/s. Le détail de la trame série est également donné en figure 3.5. Elle est constituée de 32 octets, ce qui correspond à une durée de transmission $T_{serie} = 33.3$ ms.

3.5 Expérimentation

3.5.1 Déroulement de la course



Figure 3.6 – Capture d'écran de l'intégration en direct des données issues du BAN (fréquence de foulée, nombre de pas) au flux vidéo lors de la retransmission du Marathon de Paris, le 15 avril 2012. L'incrustation est réalisée par la société Symah Vision.

Après équipement de Laurent Jalabert, le coureur s'étant prêté à l'expérimentation, également équipé d'un micro sans fil émettant dans une autre bande de fréquence, les nœuds ont été mis en route quelques minutes avant le départ de la course. Compte tenu du fort nombre de participants, l'approche par la moto et la connexion avec les nœuds n'a pas été possible exactement au moment du départ. Le lien a été maintenu durant environ deux heures, après quoi la diffusion télévisuelle de l'événement s'est achevée (après la victoire des premiers professionnels). Une brève coupure (2 minutes)

a eu lieu au bout d'une heure, la moto ayant dû s'éloigner du coureur.

Durant la durée de retransmission, l'incrustation en direct de la fréquence de foulée et du nombre total de pas a été rendue possible à plusieurs reprises, lors de diverses interviews du coureur pendant sa course. Une capture d'écran du flux vidéo est présentée figure 3.6. En revanche, la puce GPS n'a malheureusement pas réussi à fixer de signaux satellites, les informations provenant du nœud situé sur le bassin n'ont donc pas pu être exploitées. Celui-ci s'est arrêté au bout de deux heures, en raison d'une surconsommation énergétique due à la recherche de signaux GPS. Toutefois, nous avons pu récupérer les informations permettant d'évaluer la liaison entre ce nœud et le puits. Les deux autres nœuds, situés sur les chevilles, ont été opérationnels jusqu'à la fin de la course.

3.5.2 Données collectées

Grâce au système de stockage sur carte SD, l'enregistrement de nombreuses données sur les nœuds est rendu possible. Outre les informations issues des capteurs, nous avons pu également obtenir de nombreuses informations permettant de caractériser les trois liens radio. Comme nous l'avons expliqué, la balise fournit non seulement la synchronisation nécessaire au bon fonctionnement du réseau, mais également un retour sur la liaison lors de la séquence précédente. Chaque balise contient le dernier numéro de séquence reçu par le puits pour chaque nœud, ainsi que la mesure d'énergie (ED) associée. Contrairement aux deux autres nœuds, celui situé sur la cheville droite a cessé d'enregistrer au bout d'environ quinze minutes. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce problème (erreur d'écriture, déplacement de la carte, carte défectueuse...), toutefois ce dysfonctionnement n'a pas affecté les autres fonctionnalités du capteur, qui a continué à transmettre des informations correctes durant toute la retransmission de l'événement. De plus, comme toute l'information de la balise est enregistrée par les trois capteurs, nous avons pu estimer la qualité de son lien radio montant.

3.6 Analyse des résultats

Comme nous l'avons vu, malgré quelques dysfonctionnements au niveau du GPS, nous avons pu valider la liaison de bout en bout, depuis le réseau BAN jusqu'à l'incrustation en direct des données. Les résultats présentés dans cette section visent à analyser les liens entre les nœuds et le puits, et les performances générales de ce réseau simple.

	Nb. échantillons	Durée
Total analysé	139264	1h33
Balises non reçues	Nb	%
Hanche	431	0.31
Pied gauche	820	0.59
Paquets non reçus	Nb	%
Hanche	1135	0.81
Pied gauche	4074	2.93
Pied droit	7374	5.29
Déconnexion maximale	Paquets	Durée (ms)
Hanche	7	280
Pied gauche	10	400
Pied droit	10	400
Puissance des liens (dBm)	Moyenne	Ecart type
Hanche	-58.49	8.99
Pied gauche	-66.05	6.69
Pied droit	-72.87	5.92

Table 3.3 – Tableau récapitulatif des performances générales de la plateforme de communication.

3.6.1 Estimations générales

Les données sur lesquelles les résultats ont été calculés correspondent à des conditions normales de transmission, c'est-à-dire lorsque la moto est à proximité du coureur et les trois nœuds émettent. Nous ne considérons ni la durée correspondant au départ de la course jusqu'à l'établissement des connexions avec le puits, non significative, ni la durée consécutive à la mort du nœud situé sur la hanche. L'analyse porte donc sur un total de 139264 échantillons enregistrés à une fréquence de 25 Hz, recalés temporellement grâce à l'indice de séquence, ce qui correspond à une durée de 1h 33 min. Grâce aux données collectées par le nœud de la hanche et celui du pied gauche, nous pouvons dans un premier temps estimer de façon globale le nombre et le taux de balises non reçues pour ces deux nœuds, ainsi que le nombre et le taux d'erreur paquet sur les trois liens montants. De même, nous pouvons estimer l'ordre de grandeur et les variations (moyenne et écart type) de la puissance mesurée sur chaque lien lors de la réception des données par le puits. L'ensemble de ces informations est résumé dans le tableau 3.3.

De cette première approche, très globale, on peut dans un premier temps constater que le taux de balises non reçues est très faible en comparaison des paquets non décodés par le puits. L'explication la plus plausible à ce fait est liée à la taille des paquets émis. En effet, les paquets de données étant beaucoup plus longs que les balises (2 à 4 fois), la probabilité de paquets erronés est largement accrue.

Ensuite, de fortes disparités entre les trois nœuds sont mises en évidence, tant sur les pertes de paquets que sur les statistiques de puissance reçue. Ceci sera analysé

plus en détail dans la suite de l'étude, on peut néanmoins émettre les hypothèses du masquage lié au mouvement des pieds, qui met ces nœuds alternativement en vue directe (LOS, pour *Line of Sight*) ou indirecte (NLOS, *Non Line of Sight*) avec le puits, ainsi que l'orientation des nœuds. Le lien avec la hanche semble néanmoins présenter davantage de variabilité que les deux autres, ce qui semble contradictoire avec l'hypothèse supposée d'une plus grande stabilité de ce lien, pour lequel l'amplitude des mouvements est moins forte. Le fait du déséquilibre des performances entre pied droit et pied gauche peut certainement s'expliquer par le fait que la moto précédant le coureur était située légèrement à gauche de celui-ci (ce qui est visible sur la capture d'écran figure 3.6), accentuant le masquage entre le pied droit et le puits. Une différence due à la tolérance sur la puissance d'émission de chaque radio peut également s'ajouter, en moindre proportion, aux écarts constatés.

On peut remarquer d'une manière générale que les taux d'erreur paquet sont relativement faibles compte tenu de l'environnement, car malgré un effort constant pour conserver une vue directe et une faible distance entre le puits et le coureur, la présence d'autres coureurs faisant obstacle était très fréquente, particulièrement au début de la course.

3.6.2 Analyse des pertes

Il convient à présent d'analyser plus en détail les pertes qui ont eu lieu durant la course. En effet, dans un environnement aussi dynamique, il est important de connaître la durée des déconnexions qui se sont produites. Le tableau 3.4 représente la répartition de la durée des déconnexions, correspondant au nombre de paquets consécutifs non reçus par le puits lors de chaque déconnexion.

Pertes consécutives	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hanche	90.17	4.42	0.44	0.55	3.76	0.55	0.11			
Pied gauche	88.87	5.42	0.84	1.12	3.07	0.62	0.03	0	0	0.03
Pied droit	85.84	8.05	0.82	0.77	3.58	0.71	0.20	0	0.02	0.02

Table 3.4 – Répartition des pertes consécutives lors des déconnexions survenant sur chaque lien. La partie grisée indique la proportion de données effectivement perdues compte tenu du codage répétitif.

On voit que les déconnexions sont très majoritairement courtes, la quasi totalité d'entre elles étant inférieures à 3 paquets. Il est toutefois étonnant de constater sur les trois liens des déconnexions de 5 paquets (soit 200 ms) plus importantes. L'explication de ce phénomène est sans doute liée à un blocage transitoire des nœuds, plutôt qu'aux conditions de transmission. La partie grisée du tableau indique la proportion de données effectivement perdues compte tenu du codage répétitif implémenté, ce qui montre qu'au final seule une infime quantité de données n'ont pu être décodées. Si cette méthode de codage s'avère satisfaisante pour assurer une bonne qualité de service

au niveau applicatif, il est nécessaire d'optimiser l'occupation du canal et l'utilisation de la radio, en réduisant la redondance sur les paquets de données, notamment dans l'optique du passage à une échelle plus grande de coureurs équipés. Une fiabilisation efficace des liens doit être envisagée, par l'implémentation de codes correcteurs d'erreurs [Peterson and Weldon, 1972] sur les paquets erronés, ou de retransmissions automatiques en cas de non réception [Comroe and Costello, 1984]. Des méthodes coopératives [Ferrand et al., 2011, Gorce et al., 2009] et de codage réseau [MacKay, 2005] peuvent également être étudiées, afin de réduire les déséquilibres sur les pertes observées entre les différents liens, mais des informations complémentaires sur le comportement des liens entre les nœuds (on-body) sont nécessaires.

L'évolution dynamique des pertes au cours du temps permet de déduire les conditions générales de transmission durant la course. Soit $p_l(t) \in [0, 1]$ le signal correspondant aux pertes sur le lien l sur la durée de la course ($p_l(t) = 1$ si paquet non reçu). L'application à ce signal d'une moyenne glissante de taille $\Delta_t = 60s$ permet de connaître les évolutions lentes (à l'échelle de la minute) du taux d'erreur paquet, qui sont représentées figure 3.7.

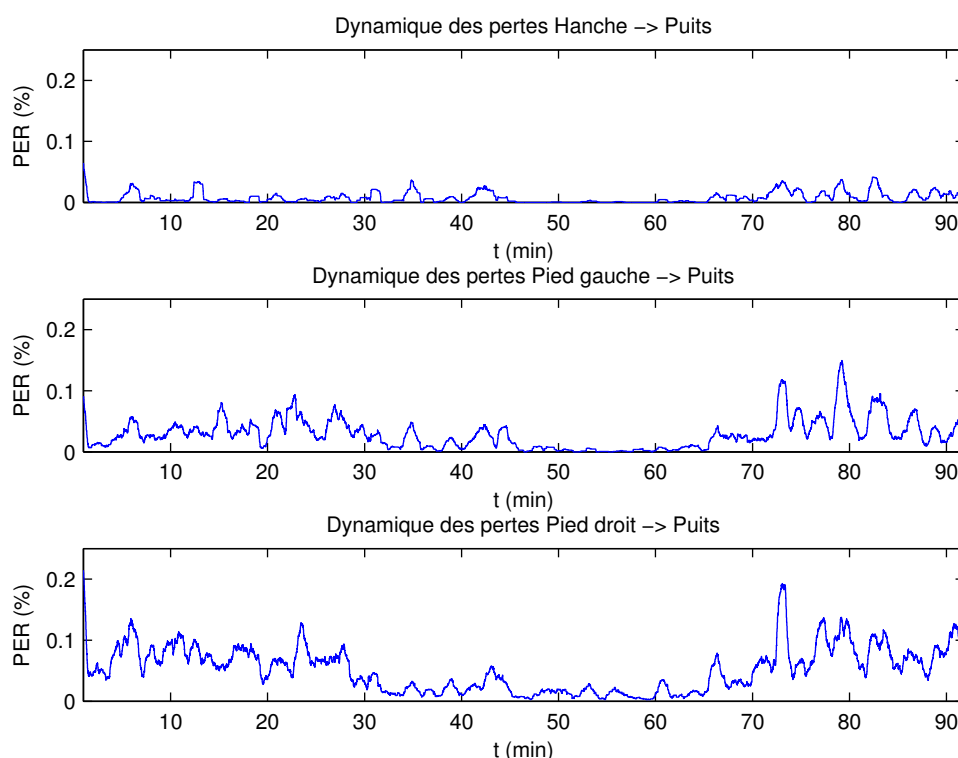


Figure 3.7 – Evolution dynamique du taux d'erreur paquet sur chaque lien, donnée pour une fenêtre glissante de durée $\Delta_t = 60s$.

On distingue assez nettement trois phases présentant des caractéristiques assez

marquées : la première, sur l'intervalle [0,45] min, correspond au début de la course, en environnement très dense avec de nombreux obstacles, entraînant des taux de pertes non négligeables, décroissant progressivement vers une seconde phase entre [45,60] min, très stable, durant laquelle les pertes sont bien inférieures. La dernière partie montre une augmentation des pertes, dont des pics assez élevés au niveau des liens des pieds, malgré une plus faible densité de coureurs. Ce phénomène est davantage lié à une distance plus variable entre le puits et les nœuds sur cette période. On retrouve également les disparités entre les nœuds évoquées précédemment, montrant une grande stabilité de la liaison avec la hanche, et un impact beaucoup plus fort des conditions de transmission sur les liens pieds->puits. Dans l'hypothèse d'un renforcement de la fiabilité des liens par une méthode de codage canal, on peut imaginer une méthode pouvant s'adapter au contexte de transmission, ajoutant davantage pour limiter les dégradations liées à l'environnement.

La méthode de saut de fréquence décrite en section 3.4.2 conduit à observer les pertes sur chacun des trois canaux utilisés par chaque nœud . Une rapide analyse des corrélations entre les pertes (à l'échelle de la minute) sur les différents canaux présentée dans le tableau 3.5 permet de déduire une évolution temporelle très similaire des pertes entre les canaux, ce qui est un comportement attendu, qui doit être vérifié de manière plus fine au niveau de l'étude des liens.

Canal	Hanche			Pied gauche			Pied droit		
	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
C_1	1	0.83	0.81	1	0.94	0.85	1	0.96	0.95
C_2	0.83	1	0.84	0.94	1	0.87	0.96	1	0.94
C_3	0.81	0.84	1	0.85	0.87	1	0.95	0.94	1

Table 3.5 – Coefficient de corrélation du taux d'erreur paquet entre les différents canaux utilisés pour chaque nœud .

3.6.3 Analyse des liens

Comme nous l'avons expliqué précédemment, chaque balise inclut la puissance reçue (métrique Energy Detection, ED, de la radio) lors de la réception des paquets de données de la trame précédente par le puits. La faible proportion de paquets non reçus permet une analyse détaillée des trois liens, des nœuds vers le puits. Une interpolation cubique est réalisée pour les données de canal absentes (déconnexions).

De la même façon que pour les pertes, nous proposons d'observer dans un premier temps l'évolution lente des canaux (à l'échelle de la minute) sur l'ensemble de la course. La figure 3.8 présentant cette évolution met en évidence un comportement similaire des canaux pieds->puits, différenciés surtout par leur niveau moyen, plus faible pour le pied droit en raison de la position du puits à gauche du coureur. Contrairement à ces deux liens, en dépit d'un niveau moyen bien supérieur, le lien hanche->puits est sujet



Figure 3.8 – Evolution des canaux (moyenne glissante, $\Delta_t = 60s$) sur la durée de course enregistrée.

à des variations lentes beaucoup plus importantes, avec une amplitude pouvant aller jusqu'à 30dB. L'hypothèse de l'environnement peut expliquer ces variations fortes. En effet, la présence d'un coureur faisant obstacle au lien hanche->puits aura tendance à diminuer considérablement la contribution du trajet principal de propagation de ce lien, et donc la puissance reçue par le puits. Pour les deux autres liens on peut imaginer que cet effet sera moindre, notamment car la partie supérieure d'un corps humain faisant obstacle (torse) est plus masquante que la partie inférieure (jambes).

Canal	Hanche			Pied gauche			Pied droit		
	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3
C_1	1	0.99	0.99	1	0.92	0.92	1	0.88	0.89
C_2	0.99	1	0.99	0.92	1	0.92	0.88	1	0.88
C_3	0.99	0.99	1	0.92	0.92	1	0.89	0.88	1

Table 3.6 – Coefficient de corrélation entre les puissances reçues à l'échelle de la seconde, sur les différents canaux utilisés pour chaque nœud. Les valeurs légèrement inférieures au niveau des pieds traduisent un caractère légèrement plus aléatoire des canaux dû à une plus grande part des multi-trajets.

Les distributions statistiques des trois liens sont représentées par les histogrammes de la figure 3.9. Cette représentation, séparant pour chaque lien les trois canaux radio associés, montre que dans cette étude des très fortes similarités sur les distributions observées. Un simple test de Kolmogorov-Smirnov entre chacun des canaux rejetant systématiquement l'hypothèse nulle tend à conclure que chacune des trois distributions empiriques de chaque lien obéissent bien à la même loi statistique. Il est

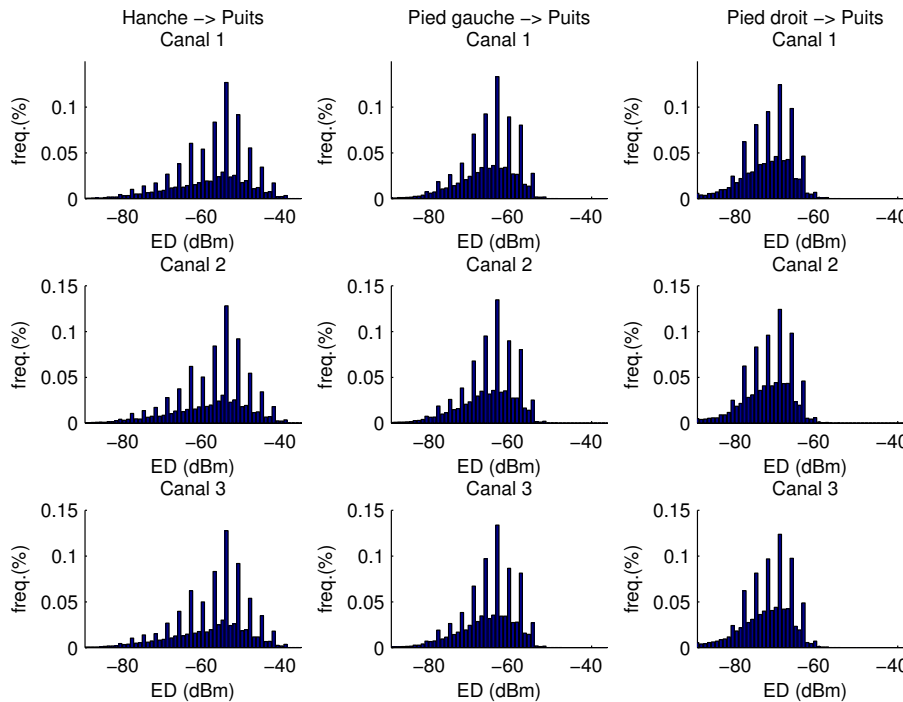
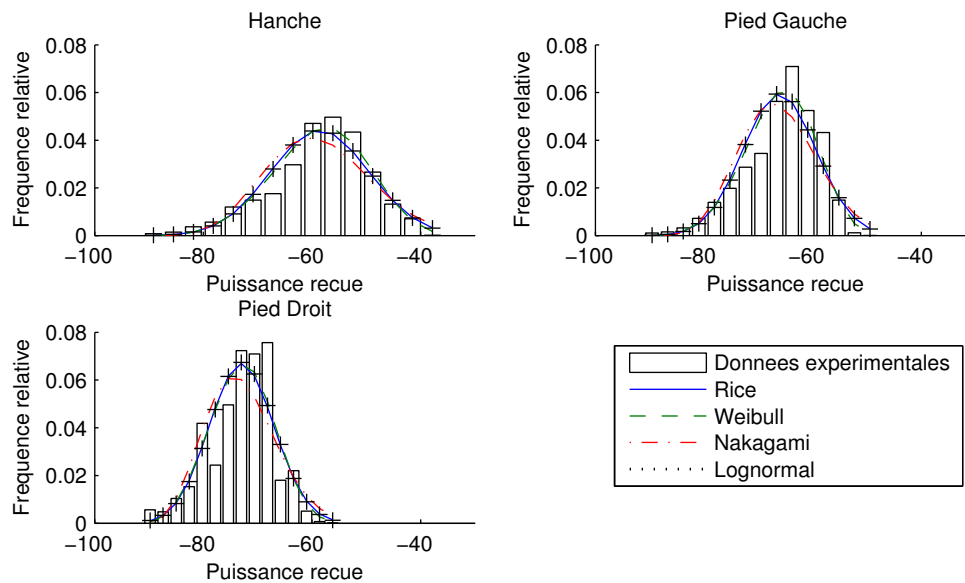


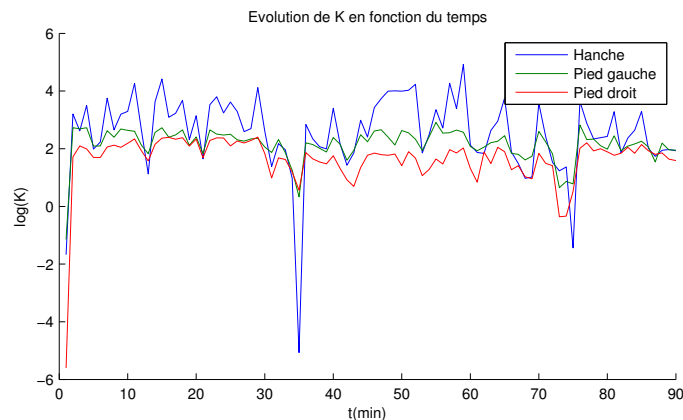
Figure 3.9 – Densité de probabilité des puissances reçues sur chaque lien, pour chaque canal radio. Les différents canaux des liens présentent des distributions identiques, on peut observer un défaut de continuité dans les densités de probabilité, dû à la mesure de l'ED.

donc statistiquement acceptable d'assimiler chaque lien à un seul canal équivalent échantillonné à 25Hz, ce qui est renforcé par une très forte corrélation temporelle entre les différents canaux, présentée dans le tableau 3.6. Les histogrammes de la figure 3.9 présentent des raies de fréquence élevée tous les 3 dB, ceci est lié à la mesure effectuée par la radio Atmel [atm, 2012]. En effet, la mesure de l'ED est une moyenne du RSSI sur 4 octets, et le RSSI est donné avec une résolution de 3dB, donc malgré le moyennage effectué pour l'obtention de l'ED, on observe qu'on a tendance à conserver la résolution donnée pour le RSSI. Comme on a pu l'observer à large échelle, le lien de la hanche se différencie des deux autres par une distribution plus étalée, trahissant de plus amples variations, étant également moins limité par la borne inférieure de la plage de mesure, située à -91 dBm.

La figure 3.10a montre le résultat de l'approximation de la densité de probabilité empirique de chaque lien par des fonctions connues (le nombre de barres des histogrammes a été réduit pour une meilleure lisibilité de la figure). On peut constater que sur l'ensemble du scénario, les distributions empiriques ont tendance à se fondre dans un comportement normal, ce qui possiblement traduit l'agrégation de plusieurs comportements particuliers à de plus fines échelles temporelles. En effet, si l'on choisit



(a) Approximation des densités de probabilité empiriques de chaque lien par des fonctions usuelles.



(b) Evolution temporelle du paramètre K de la distribution de Rice associée à chaque distribution empirique.

Figure 3.10 – Analyse des distributions statistiques de la puissance reçue sur chacun des trois liens.

maintenant d'approcher les signaux mesurés chaque minute par une distribution de Rice, en extrayant le paramètre K (représentant sur la figure 3.10b la part d'un trajet direct par rapport aux multi-trajets), on peut observer des variations non négligeables de ce paramètre. Les chutes de K aux instants $t = 35$ min et $t = 75$ min, particulièrement fortes pour le lien impliquant le nœud situé sur la hanche, traduisent la faiblesse du trajet direct sur l'espace d'une minute. Ceci est un effet de l'environnement à prendre en compte dans le cas d'une modélisation du lien off-body dans ces conditions, en particulier si le nœud situé sur la hanche est destiné à être coordinateur.

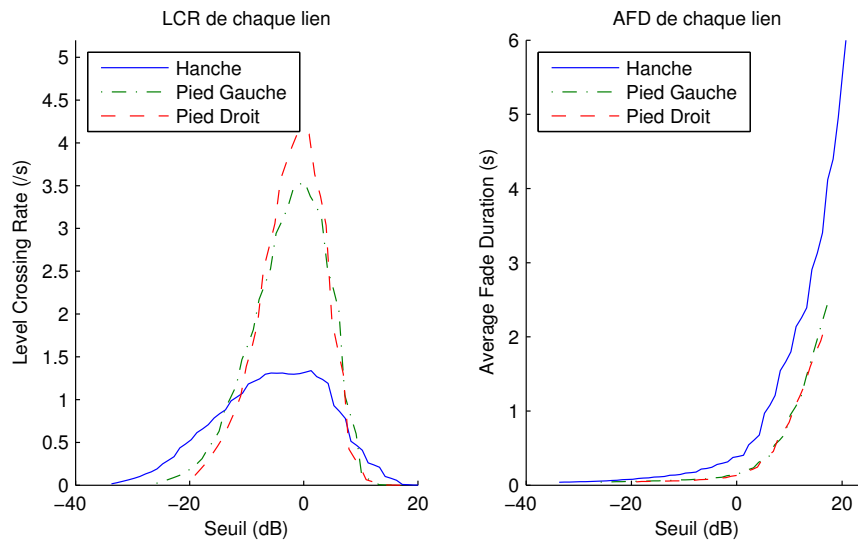


Figure 3.11 – Level Crossing Rate et Average Fade Duration, caractérisant la dynamique de chaque lien. Le seuil est normalisé par rapport à la valeur efficace des liens. On note une plus grande dynamique des liens pieds->puits pour les faibles valeurs de seuil, alors que les évanouissements profonds semblent plus fréquents sur le lien de la hanche. Les évanouissements moins profonds s'avèrent légèrement plus longs sur le lien hanche->puits.

La dynamique des évanouissements peut être appréhendée par les métriques *Level Crossing Rate* et *Average Fade Duration* [Proakis and Salehi, 2008]. La première, LCR, présente la fréquence à laquelle le signal franchit un seuil ρ , ce seuil étant normalisé par rapport à la valeur efficace du signal. La métrique AFD caractérise quant à elle la durée moyenne durant laquelle le signal est inférieur au seuil ρ . Ces deux métriques sont présentées sur la figure 3.11. On peut observer une plus forte dynamique des liens pieds->puits pour des évanouissements d'amplitude relativement peu importante. Des oscillations plus rapides au niveau du pied droit autour des faibles valeurs traduisent également une part légèrement plus importante des multi-trajets, donc d'un caractère légèrement plus aléatoire de ce lien. Le lien hanche->puits présente quant à lui une stabilité plus importante, mais des évanouissements profonds (inférieurs à -20 dB) plus fréquents que les deux autres. L'analyse de la durée moyenne des évanouissements montre que les évanouissements profonds sont généralement courts (inférieurs à 80 ms, soit deux trames consécutives, pour $\rho = -20$ dB). On peut en revanche constater pour les valeurs supérieures de ρ des évanouissements plus longs au niveau de la hanche, bien que moins fréquents.

Il convient également de vérifier, du fait de la régularité du mouvement tout au long de la course, que le masquage présente des motifs périodiques. Ceci peut en effet être utile pour envisager une prédiction des atténuations lentes des liens, permettant

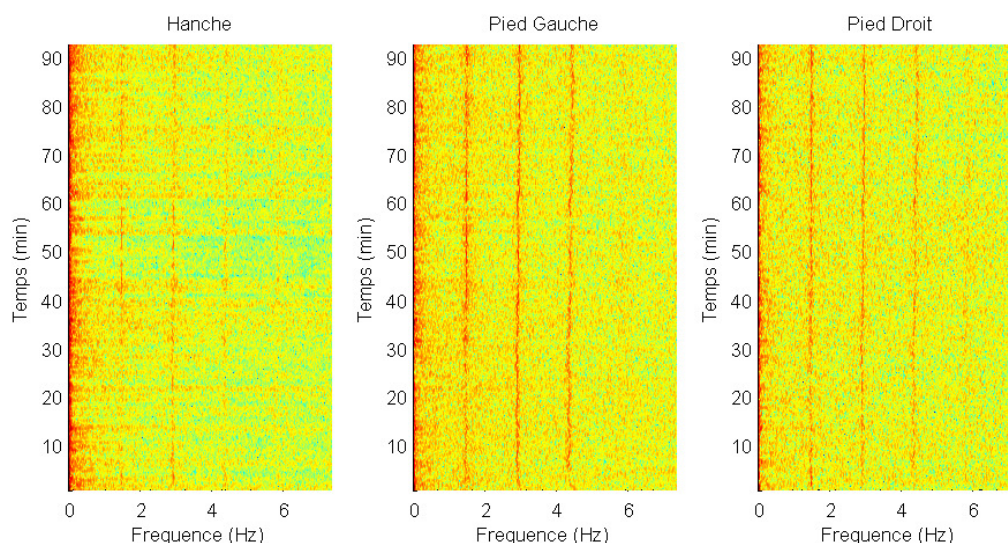


Figure 3.12 – Spectrogramme de chaque lien durant la course, montrant l'évolution temporelle de la densité spectrale de puissance. La périodicité des effets du masquage lié au mouvement régulier de course est mise en évidence par la combinaison principale de trois fréquences, correspondant à la fréquence de foulée (fondamentale) et ses deux premières harmoniques.

de privilégier des transmissions à des instants où le niveau de canal est globalement plus élevé, ou d'adapter la puissance d'émission. La figure 3.12 présente les spectrogrammes temporels de chaque lien, chaque ligne horizontale représentant la densité spectrale de puissance des canaux calculée sur 2048 échantillons, soit une durée d'environ 80 s. La périodicité des liens est marquée ici par la présence de trois raies principales dans le spectrogramme, que l'on observe sur toute la durée de la course. La fondamentale correspond précisément à la fréquence de foulée $f_{foulée} = 1.4$ Hz calculée sur les signaux des accéléromètres, les raies suivantes en constituant les deux premières harmoniques. L'aspect périodique est beaucoup moins présent au niveau de la hanche, dont l'énergie est principalement localisée près de la composante continue. Il est à noter également que l'amplitude des trois composantes est liée à la qualité générale des conditions de transmission. Dans l'hypothèse d'une prédiction du masquage par les nœuds avec une détection de la fréquence de foulée, l'échantillonnage du canal devrait donc être réalisé à une fréquence $f_e \geq 2 \times n_h \times f_{foulée}$, n_h étant le nombre de raies significatives du spectre, égal à 3 dans notre cas, soit $f_s \geq 8.4$ Hz.

3.7 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté dans ce chapitre l'ensemble des étapes de conception d'une plateforme de collecte de données issues de plusieurs capteurs embarqués sur le corps humain, dans le but d'une intégration en direct au flux télévisuel. Nous montrons qu'il est possible d'assurer une très bonne connectivité entre les nœuds situés sur un coureur et un puits mobile via des communications radio répondant à la norme 802.15.4, ce qui valide le choix de la plateforme de communication.

Les contraintes applicatives concernant la qualité de service, (latence, fréquence d'acquisition des informations, faibles pertes) ont été remplies lors de l'événement, et certaines données ont pu être diffusées en direct. Le stockage de nombreuses informations liées aux transmissions a permis une analyse a posteriori des différents liens radio du réseau, mettant en évidence des similarités entre les liens à forte mobilité (pieds->puits), notamment sur la dynamique des évanouissements et la périodicité des canaux. Des variations lentes beaucoup plus élevées ont pu être observées sur le lien hanche->puits, qui reste malgré tout, avec un niveau de signal moyen plus fort et une plus grande stabilité, un lien privilégié pour la communication *off-body*. La connaissance partielle des canaux apportée par la métrique Energy Detection de la radio met en évidence des motifs périodiques liés au mouvement du corps, principalement des jambes, et dans une moindre mesure, de la hanche, pouvant ouvrir la voie à des méthodes de prédiction du masquage. Il reste néanmoins difficile de séparer les influences diverses d'autres facteurs liés à l'environnement de propagation, comme la présence d'obstacles, la distance entre les nœuds, la densité ou les interférences; les traces observées dans un environnement ni contrôlé, ni contrôlable, sont la somme de toutes ces influences, et le système mis en œuvre doit s'y adapter.

Nous l'avons vu, malgré une majorité de courtes déconnexions, le taux de paquets erronés peut varier sur chaque lien d'un facteur très élevé, du simple fait de l'environnement. Si la simple méthode de codage répétitif retenue ici satisfait les requêtes applicatives de l'expérimentation en annulant l'effet des interruptions courtes, d'autres méthodes devront être retenues afin de limiter le volume d'informations transmises et de pouvoir décoder des paquets erronés, ce qui conduira à une utilisation plus efficace du canal radio. Dans l'optique d'une extension du réseau à davantage de coureurs, des protocoles de collecte d'information s'adaptant à l'évolution de la topologie du réseau devront être mis au point, ainsi qu'une gestion des interférences entre les BAN.

4 Mesures maillées des canaux des BAN

Sommaire

4.1	Introduction	51
4.2	Plate-forme de mesure et cadre expérimental	52
4.2.1	Matériel utilisé	53
4.2.2	Conception de la plate-forme de mesure	53
4.2.3	Cadre expérimental	55
4.3	Analyse des canaux	58
4.3.1	Stabilité temporelle du canal	61
4.3.2	Symétrie des liens	63
4.4	Coopération et contrôle de puissance	67
4.4.1	Variation de la puissance d'émission	68
4.4.2	Algorithmes coopératifs	70
4.5	Conclusion	75

4.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans la section 2.3.3 du premier chapitre de cette thèse, d'importants efforts ont été réalisés dans le but de modéliser les canaux des BAN,

principalement basés sur des ensembles de mesures. En premier lieu statistiques, les analyses se sont peu à peu orientés vers une modélisation plus réaliste, tenant compte de l'évolution temporelle des canaux et de leur aspect corrélé. Ces aspects sont indispensables pour obtenir un modèle réaliste du masquage, sur lequel pourront s'appuyer la réalisation et l'évaluation de protocoles coopératifs efficaces.

Les mesures effectuées au moyen d'appareils traditionnels (VSA, VNA...), ont tendance à contraindre le cadre expérimental, et bien que bénéficiant d'une grande précision, la réalisation de scénarios BAN en conditions de mouvement réelles est de ce fait relativement limitée. Or, les capteurs industriels actuels ayant la capacité de mesurer la puissance des canaux lors de la réception de paquets radio, ils peuvent être eux-mêmes utilisés comme plate-formes de mesure. L'intérêt est double : tout d'abord ils offrent une pleine liberté de mouvement et de scénarios, ce qui peut permettre la constitution de bases de données conséquentes; il est également possible d'évaluer la fiabilité des métriques fournies par les radios industrielles, ce qui est en pratique utile pour la réalisation de protocoles.

Les travaux présentés dans ce chapitre, dont une partie des résultats sont donnés dans sa thèse [Ferrand, 2013], ont été réalisés en collaboration avec Paul Ferrand. Nous avons souhaité réaliser notre propre plate-forme de mesure à base de capteurs industriels. Contrairement à la plupart des plate-formes réalisant une topologie en étoile, celle-ci permet, dans un temps court, de récupérer un échantillonnage des canaux du maillage complet du BAN. Nous bénéficions alors de la connaissance de l'ensemble des canaux, dans les deux sens de propagation. Nous nous sommes d'abord intéressés à la stabilité temporelle des canaux, sur des scénarios de marche en intérieur et en extérieur. Si certains travaux ont déjà cherché à l'évaluer, il convient ici de vérifier la stabilité obtenue en pratique, ce qui constitue une donnée importante dès lors que l'on souhaite mettre en œuvre une prédiction du canal permettant d'adapter au plus juste la puissance d'émission des nœuds. De plus, la connaissance des canaux dans les deux sens de propagation permet également d'évaluer dans quelle mesure l'hypothèse courante de symétrie est vérifiable en pratique. Ainsi, il est possible de connaître la validité d'une prédiction de canal d'une source vers une destination basée sur l'estimation du lien dans l'autre sens. A la fin de ce chapitre, partant du besoin vérifié de coopération pour limiter l'énergie rayonnée lors de la collecte d'informations dans un BAN, nous proposons de réutiliser les traces obtenues lors des mesures pour une évaluation simple de protocoles coopératifs.

4.2 Plate-forme de mesure et cadre expérimental

Comme nous l'avons expliqué, la mesure des affaiblissements sur un maillage complet permet d'obtenir de nombreuses connaissances sur le comportement des canaux

4.2. Plate-forme de mesure et cadre expérimental

Débit	250kbps
Modulation	Offset-QPSK avec étalement de spectre (DSSS)
Plage de fréquence	2408-2480 MHz
Nombre de canaux	16
Espace inter-canaux	5 MHz
Puissance d'émission P_{TX}	[-17;+3] dBm (2 mW)
Tolérance sur P_{TX}	± 3 dB
Sensibilité	-101 dBm à 250 kbps
Plage de la détection d'énergie (ED)	[-91;-8] dBm ± 1 dB
Détection d'erreur	CRC16
Antenne	Chip (intégrée au PCB)

Table 4.1 – Caractéristiques principales de la radio Atmel AT86RF231.

en situation de mouvement. De plus, l'utilisation de capteurs industriels offre une pleine liberté d'expérimentation et de mouvement, sans les contraintes liées aux appareils de mesure classiques. Cela conduit également à une estimation de la qualité des métriques fournies par les composants radio industriels, et à la conception de protocoles adaptés à ces métriques. Après un travail préparatoire conjoint avec Paul Ferrand pour définir les modalités de la plate-forme, j'ai pris en main sa réalisation.

4.2.1 Matériel utilisé

Nous proposons ici d'utiliser à nouveau les capteurs HiKoB Fox, cette fois uniquement dans un but de mesures radio, les données issues des capteurs inertiels n'étant pas l'objet de cette étude. Les capteurs sont décrits dans la section 2.4.2, nous rappelons simplement les principales caractéristiques radio de ces nœuds, dans le tableau 4.1.

Il est à noter qu'outre la résolution de l'ED de ± 1 dB, dont nous avons pu observer les défauts dans le chapitre précédent (persistance en réalité de la résolution du RSSI de ± 3 dB), il existe une tolérance élevée sur la puissance d'émission (± 3 dB), qui peut s'ajouter à l'imprécision de la mesure. De plus, compte tenu des conditions environnementales, la mesure de l'ED peut présenter une tolérance absolue allant jusqu'à ± 5 dB, celle-ci étant précisée constante par Atmel. L'ensemble de ces défauts de mesure devront être pris en compte et évalués lors de l'analyse des données. Pour l'ensemble des expérimentations, nous profiterons de la plage de mesure d'ED maximale, ce qui se traduit par des émissions à puissance maximale (3 dBm) par tous les nœuds.

4.2.2 Conception de la plate-forme de mesure

Le but de la plate-forme est la réalisation d'une collecte simultanée à une fréquence régulière de l'ensemble des valeurs de l'ED sur chacun des liens du réseau maillé. Si une

mesure parfaitement simultanée n'est pas possible (les nœuds étant soit en émission, soit en réception, et ne possédant qu'une seule radio), il est en revanche raisonnable de considérer une mesure quasi-simultanée en mettant en place un protocole à accès répartis dans le temps. En effet, la radio Atmel n'imposant aucune contrainte sur le protocole de communication au niveau MAC, il est possible de définir une super-trame simple constituée d'un ensemble $T_1 \dots T_N$ de slots d'émission égaux, N étant le nombre de nœuds du BAN. Ainsi, durant le slot T_i , le nœud i transmet un paquet radio, tandis que les autres nœuds $j \neq i$, en état de réception, décodent le paquet émis et stockent la mesure d'ED correspondante en RAM. Une fois l'ensemble des transmissions effectuées, une durée T_{sd} est réservée dans la trame à l'écriture sur le buffer destiné à la carte SD. Lorsque celui-ci est plein, l'écriture sur la carte est effectuée, ce qui représente une durée non négligeable à l'échelle de la trame (environ 2.5 ms). Le réglage du protocole vise à assurer un bon fonctionnement du réseau en minimisant la durée nécessaire à l'exécution d'une trame complète et donc la durée d'inactivité du réseau. Grâce à ce protocole, chaque nœud participe à la synchronisation du réseau, chaque paquet reçu servant au recalage temporel des récepteurs, ce qui réduit considérablement la probabilité qu'un nœud sorte momentanément du réseau à cause d'un défaut de synchronisation.

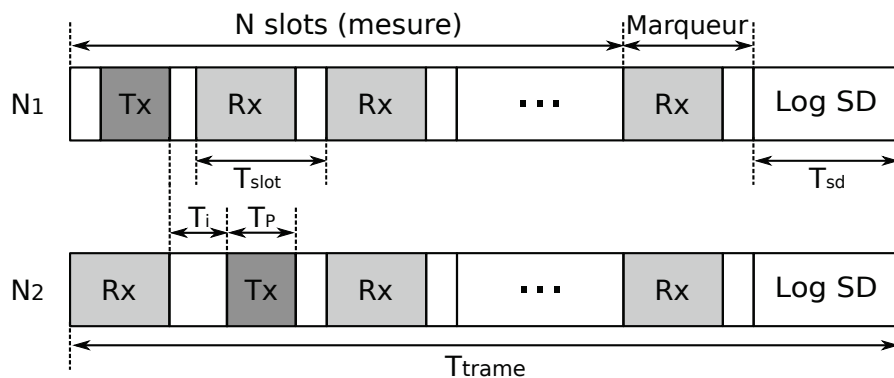


Figure 4.1 – Illustration du protocole séquentiel mis en place pour les mesures maillées. Le comportement des deux premiers nœuds est représenté. Un slot de contrôle est réservé pour le marqueur, ainsi que pour l'écriture sur la carte SD.

Transmission d'1 octet	T_o	32 μs
Transmission d'1 paquet	T_p	576 μs
Durée entre deux transmissions	T_i	900 μs
Slot d'écriture SD	T_{sd}	2.5 ms
Trame complète (6 nœuds + marqueur)	T_{trame}	12.832 ms

Table 4.2 – Timings caractéristiques du protocole de mesure radio.

De plus, diverses fonctionnalités ont été ajoutées, pour une bonne flexibilité de la plate-forme et l'aspect pratique des expérimentations. Tout d'abord, la plate-forme doit être facilement adaptable au nombre de nœuds du réseau, afin qu'un changement

de configuration du BAN ne conduise pas à la reprogrammation de tous les capteurs. Nous faisons pour cela le choix que le nœud 1 transmette dans chaque paquet radio la configuration du BAN, notamment le nombre de nœuds, mais également la durée nécessaire entre une réception et l'émission suivante (nécessaire à l'optimisation du réglage de la trame). Une information optionnelle peut être transmise dans le cas où l'on souhaiterait ajouter aux paquets radio une charge artificielle de données applicatives générée aléatoirement. La puissance d'émission est également incluse dans la configuration. Les données de configuration sont relayées par tous les nœuds, permettant, en cas de redémarrage, une reconfiguration instantanée. Au démarrage des nœuds, ceux-ci écoutent le canal radio de façon permanente jusqu'à recevoir un paquet contenant la configuration, et calculent automatiquement la durée de la super-trame. L'identifiant du nœud reçu situe l'avancement de la trame, le récepteur peut alors s'intégrer au réseau. Un indice de trame permet le recalage des informations stockées sur les différentes cartes pour l'analyse.

Durant la super-trame, un temps de parole additionnel est ajouté à la suite des slots réservés aux nœuds de mesure, destiné à un nœud particulier que nous appellerons *marqueur*. Celui-ci transmet de manière continue un numéro de mesure actuelle ainsi qu'un ordre aux autres nœuds d'écrire ou non sur la carte SD. L'état de cet ordre est commandé par le bouton poussoir situé sur le marqueur, afin d'isoler chaque scénario de manière précise et de faciliter l'analyse des données a posteriori. Enfin, afin de suivre le bon fonctionnement de la plate-forme (présence de tous les nœuds, mesure en cours, vérification de l'ordre d'écriture...), en complément à une méthode de visualisation par les LED des capteurs Fox, un nœud *sniffeur* relié à un PC en écoute permanente, indique à la fin de chaque trame la liste des nœuds entendus, ainsi que le numéro de mesure courante et précise si l'écriture est active.

La figure 4.1 illustre le protocole radio implémenté pour la réalisation de la plate-forme de mesure, et le tableau 4.2 donne l'ensemble des durées caractéristiques de ce protocole. La taille de chaque paquet radio, incluant le préambule de la couche physique, le CRC, et l'ensemble des informations de configuration s'élève à $D_p = 18$ octets. Dans une topologie à $N = 6$ nœuds et un marqueur, on obtient une durée totale de trame $T_{trame} = (N + 1) \times (D_p \cdot T_o + T_i) + T_{sd} = 12832$ ms, ce qui nous donne une fréquence de mesure du maillage complet proche de 78 Hz. Ainsi, tant au niveau de la durée d'un slot que de la trame complète, la résolution temporelle de cette plate-forme de mesure est satisfaisante eu égard à la stabilité estimée des canaux des BAN [Fu et al., 2012].

4.2.3 Cadre expérimental

Nous avons retenu pour l'essentiel de nos mesures un scénario de déploiement classique de BAN, à 6 nœuds tel que représenté sur la figure 4.2. Le numéro de chaque

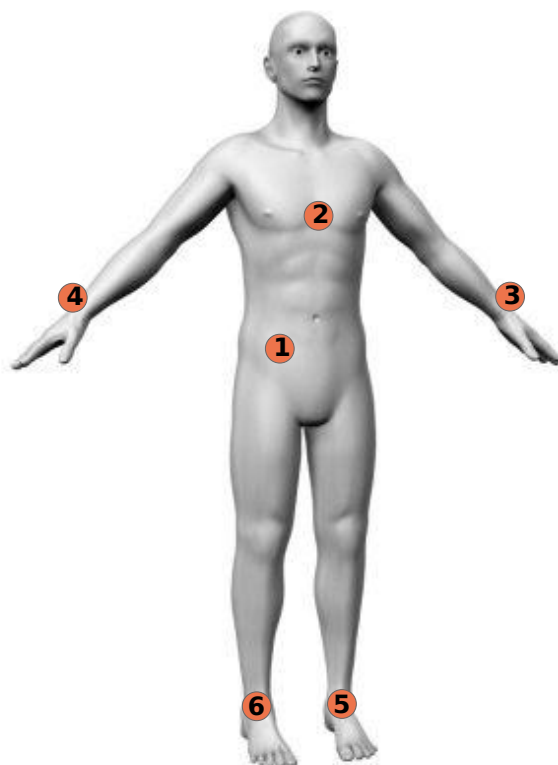
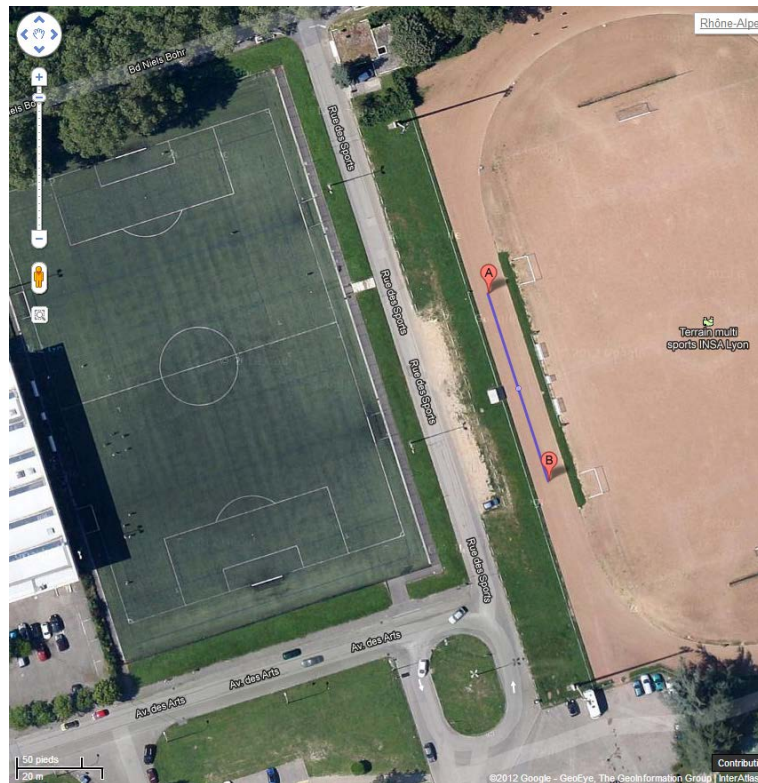


Figure 4.2 – Position des noeuds pour les mesures de canaux des BAN.

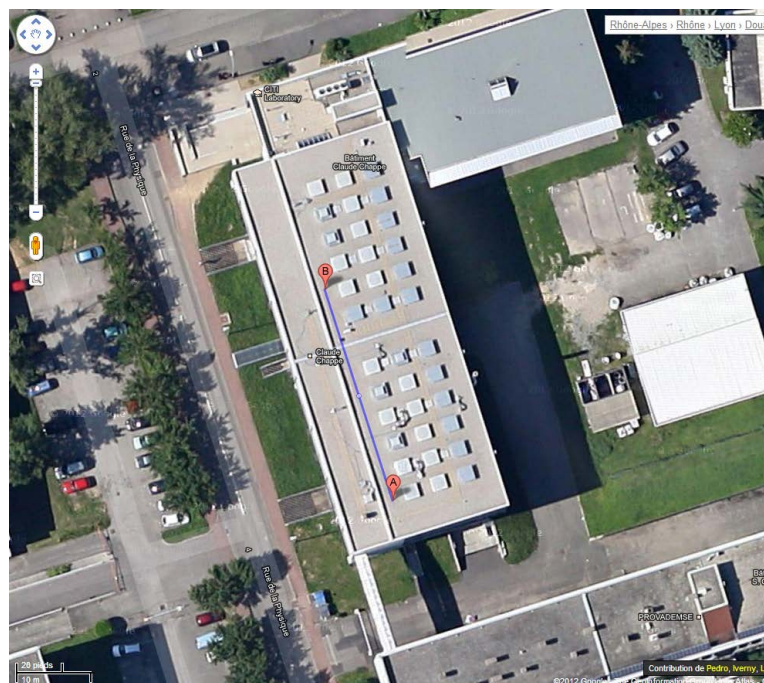
nœud sur cette figure correspond à son identifiant radio. On suppose que dans ce type de scénario 5 nœuds tentent de transmettre leurs informations à un nœud central, en l'occurrence le nœud 1, situé sur la hanche. Pour cette étude, des scénarios de marche ont été privilégiés, en intérieur et en extérieur. Dans ces situations de mouvement régulier, le marqueur commandant l'écriture des données est actionné par le sujet équipé. Les données récupérées seront ensuite débarrassées des effets de bord liés au démarrage et à l'arrêt du mouvement.

Nous avons réalisé nos mesures à deux endroits du campus de la Doua, avec l'objectif de contrôler autant que possible l'environnement expérimental, c'est-à-dire en évitant les interférences (Wifi, éléments mobiles, êtres humains...). C'est pourquoi, pour les mesures en extérieur, nous avons retenu une zone dégagée, en l'occurrence le terrain de course du campus de la Doua. Le trajet effectué à plusieurs reprises en extérieur, d'environ 30 m, est représenté sur la figure 4.3a. Le trajet effectué en intérieur, au sous-sol du bâtiment du laboratoire (identifié sur la figure 4.3b), mesure environ 40 mètres. Il s'agit d'un couloir assez étroit en béton. A cet endroit les signaux Wifi sont quasi-inexistants.

4.2. Plate-forme de mesure et cadre expérimental



(a) Trajet d'environ 30m, à l'extérieur et à environ 100m des bâtiments environnants.



(b) Trajet d'environ 40m, à l'intérieur du bâtiment du laboratoire.

Figure 4.3 – Trajets considérés dans ce chapitre

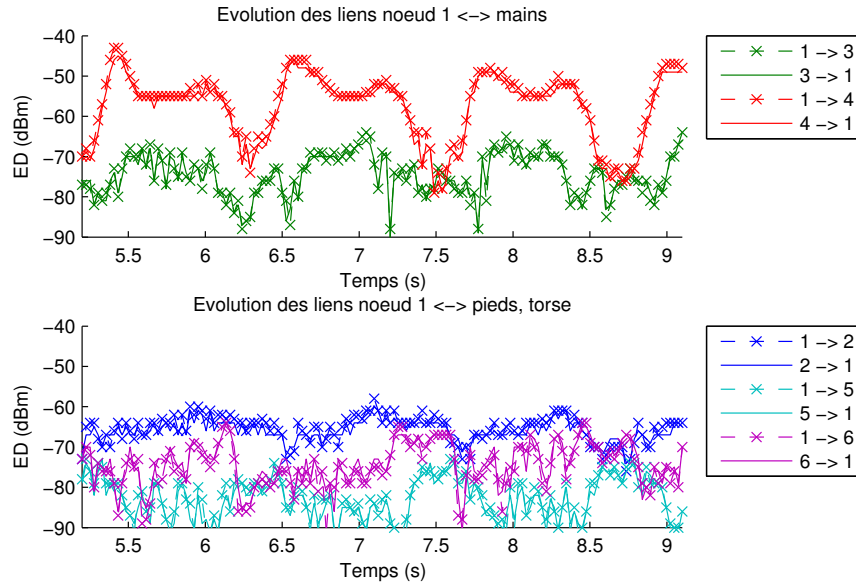
4.3 Analyse des canaux

Dans cette partie, nous reprenons une partie des résultats présentés dans la thèse de Paul Ferrand [Ferrand, 2013], concernant la caractérisation des canaux mesurés avec nos capteurs industriels. La partie suivante présentera une approche plutôt orientée vers une réutilisation des données acquises dans le but d'estimer la validité de protocoles coopératifs.

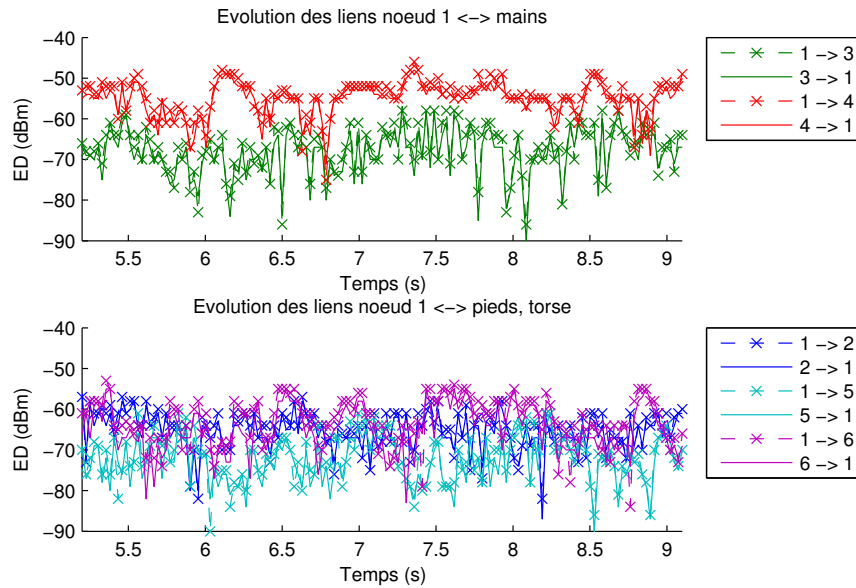
Nous observons dans un premier temps l'évolution temporelle des signaux acquis en intérieur et en extérieur, représentée sur l'ensemble de figures 4.4, pour les liens avec le nœud de la hanche, qui sera assimilé à un puits. Pour plus de lisibilité nous avons séparé dans chaque cas les différents liens, ainsi la figure du haut représente les liens impliquant les nœuds des poignets, celle du bas incluant les nœuds des pieds et du torse. Quelques secondes de chaque trajet ont été sélectionnées, en prenant soin d'éviter les instants de démarrage et d'arrêt du mouvement, donc pour ces portions le mouvement est aussi régulier que possible.

Dans le cas en extérieur, la régularité du mouvement est extrêmement présente sur le lien avec la main droite (nœud 4), qui présente une longue période de stabilité et un niveau de signal fort, en comparaison avec le nœud 3, au niveau de la main gauche. Pour ce dernier, on retrouve un motif évoluant également de manière périodique, mais à un niveau beaucoup plus faible, et une stabilité moindre. Comme nous l'avons déjà observé dans le chapitre précédent pour les liens off-body, la position et l'orientation des capteurs sur le corps est un facteur important de l'évolution des canaux en extérieur. Le fait que le nœud 1 soit placé légèrement à droite, sur la hanche entraîne de fortes disparités entre les liens des nœuds 3 et 4. En observant la seconde partie de la figure 4.4a, on peut remarquer que le lien avec le torse (nœud 2) semble beaucoup moins affecté par le mouvement, et se trouve très stable, avec quelques oscillations de faible amplitude et un aspect périodique très atténué. Dans le cas des pieds (nœuds 5 et 6), on retrouve des disparités semblables aux liens des mains, liées à l'orientation des nœuds, le niveau du lien droit étant globalement plus élevé que le gauche. Un motif périodique est observable, toutefois l'instabilité de ces liens, notamment celui avec nœud 5, est beaucoup plus forte, ce qui traduit la plus grande incertitude d'une ligne de vue directe avec le puits, et des effets d'évanouissements plus fréquents.

Les mesures en intérieur mettent en évidence des canaux très différents du cas précédent. Du fait d'une propension bien plus forte aux multi-trajets, les canaux dans cet environnement semblent beaucoup plus indépendants du mouvement et de l'orientation des nœuds. Dans l'exemple du nœud 4, on remarque que la périodicité très forte observée précédemment est presque "gommée" au profit d'un canal beaucoup plus constant. Pour l'ensemble des autres canaux le niveau moyen semble plus élevé, avec des variations rapides plus présentes, et les différences entre les liens



(a) *Haut*: Valeur de la métrique ED mesurée pour les liens du nœud 1 (hanche) vers les nœuds des mains (3 et 4). *Bas*: ED mesurée entre le nœud 1 et les trois autres nœuds (pieds, torse). Ces mesures ont été acquises en extérieur, et présentent les deux sens de propagation.



(b) *Haut*: Valeur de la métrique ED mesurée pour les liens du nœud 1 (hanche) vers les nœuds des mains (3 et 4). *Bas*: ED mesurée entre le nœud 1 et les trois autres nœuds (pieds, torse). Ces mesures ont été acquises en intérieur, et présentent les deux sens de propagation.

Figure 4.4 – Evolution temporelle des canaux impliquant le nœud 1, en intérieur et en extérieur.

	Noeud 1	Noeud 2	Noeud 3
Noeud 1	∅	-78.9/8.8	-78.0/41.1
Noeud 2	-79.7/4.9	∅	-71.4/9.4
Noeud 3	-78.3/40.3	-70.4/8.5	∅
Noeud 4	-66.6/44.0	-67.2/20.4	-81.0/28.9
Noeud 5	-82.8/15.7	-85.9/11.9	-76.8/26.8
Noeud 6	-77.5/17.8	-82.8/17.0	-87.0/12.8

	Noeud 4	Noeud 5	Noeud 6
Noeud 1	-67.5/42.7	-83.7/15.0	-78.9/18.7
Noeud 2	-67.9/33.2	-86.5/11.6	-84.0/12.7
Noeud 3	-81.0/22.8	-77.6/27.8	-87.7/11.5
Noeud 4	∅	-78.7/57.8	-75.6/47.5
Noeud 5	-78.2/55.8	∅	-59.6/28.5
Noeud 6	-74.5/46.7	-59.2/23.5	∅

Table 4.3 – Valeurs des moyennes/variances (en dBm/dB) pour une réalisation du trajet 1 en extérieur.

	Noeud 1	Noeud 2	Noeud 3
Noeud 1	∅	-65.5/24.6	-69.1/22.8
Noeud 2	-65.0/28.6	∅	-60.6/39.3
Noeud 3	-68.6/30.4	-59.9/40.1	∅
Noeud 4	-60.9/36.1	-62.8/22.7	-69.7/31.4
Noeud 5	-75.4/30.6	-70.4/42.9	-66.8/36.1
Noeud 6	-67.4/38.2	-68.9/30.3	-73.3/31.5

	Noeud 4	Noeud 5	Noeud 6
Noeud 1	-61.7/36.1	-75.5/28.9	-68.9/30.6
Noeud 2	-63.3/28.8	-71.4/40.2	-70.7/31.9
Noeud 3	-70.3/33.5	-67.3/33.8	-74.1/29.6
Noeud 4	∅	-74.4/32.7	-67.0/32.1
Noeud 5	-74.8/28.4	∅	-67.2/29.3
Noeud 6	-66.3/38.6	-66.7/30.4	∅

Table 4.4 – Valeurs des moyennes/variances (en dBm/dB) pour une réalisation du trajet 2 en intérieur.

observées précédemment tendent à se fondre dans un comportement similaire.

De cet ensemble de mesures nous constatons également un léger décalage entre les canaux dans le sens aller (nœud 1 vers nœud i) et retour (nœud i vers nœud 1), que nous détaillons plus loin.

Les moyennes et variances des différents canaux pour chaque scénario sont données dans les tables 4.3 et 4.4. L'observation précédente concernant le niveau moyen des liens est confirmée par ces tables, qui mettent en évidence des liens globalement

plus élevés en intérieur, et dans des proportions non négligeables, allant jusqu'à des différences de 15 dB. Le niveau global de puissance du lien est lié à davantage de contributions des multi-trajets ; si l'on prend le cas du lien entre la hanche et le torse (nœud 2), très stable en extérieur, on remarque que la variance sur ce lien est presque triplée en intérieur. Dans des proportions moindres, les liens impliquant les pieds voient leur variance augmenter. A l'inverse, elle semble diminuer sur les liens des mains, ce qui traduit la réduction de l'amplitude des variations liées au mouvement.

4.3.1 Stabilité temporelle du canal

Les premiers résultats, très visuels, quant au comportement et à la stabilité des canaux méritent une analyse plus fine, afin d'obtenir des estimations utiles à des modèles, et à la réalisation de protocoles. Une métrique utilisée dans la littérature pour évaluer la stabilité d'un canal est celle du temps de cohérence. Elle est donnée par une valeur de coupure de la fonction d'autocorrélation du canal, dans notre cas 0.5, conformément à [Fu et al., 2012, D'Errico and Ouvry, 2010].

Les mesures données par l'ensemble de figures 4.5 illustrent l'étendue de cette métrique, notamment en extérieur, entre un lien avec la main, et un lien avec le pied, entre lesquels la valeur varie presque d'un facteur 4. En intérieur cette différence de temps de cohérence tend à s'effacer, en raison de l'instabilité apportée par une plus grande part des multi-trajets. L'ensemble des valeurs est présenté dans les tableaux 4.5 et 4.6.

Comme l'illustre l'exemple, celles-ci sont beaucoup plus élevées sur le trajet extérieur et se réduisent drastiquement en intérieur. Leur homogénéité dans ce dernier cas vient appuyer les observations précédentes des canaux, mais les valeurs sont en revanche bien inférieures à celles données par [Fu et al., 2012, D'Errico and Ouvry, 2010], qui donnent environ 125 ms en extérieur et 80 ms en intérieur. Si certains liens en extérieur sont en accord avec ces valeurs, ce n'est pas le cas de l'ensemble, et notamment des liens naturellement plus soumis aux multi-trajets.

Si ces informations sont importantes pour la modélisation, nous avons vu également dans le premier chapitre de cette thèse, que certains protocoles récents visent non seulement à appliquer des méthodes de relayage, mais également un contrôle de la puissance d'émission dépendant d'une estimation/prédiction de la qualité des liens, comme [Dong and Smith, 2014]. Dans ce cas, il est important de quantifier en pratique les variations "instantanées" du canal, c'est-à-dire d'une trame à l'autre. Avec notre résolution de 13 ms, il convient de vérifier dans quelle mesure une estimation de lien à un instant $k - 1$ reste valide à un instant k , et donc dans quelle mesure (compte tenu de la résolution temporelle) les évanouissements vont affecter le canal.

Soit $g_{i,j}[k]$ la valeur de l'ED reçue par le nœud j depuis le nœud i à l'instant k . On

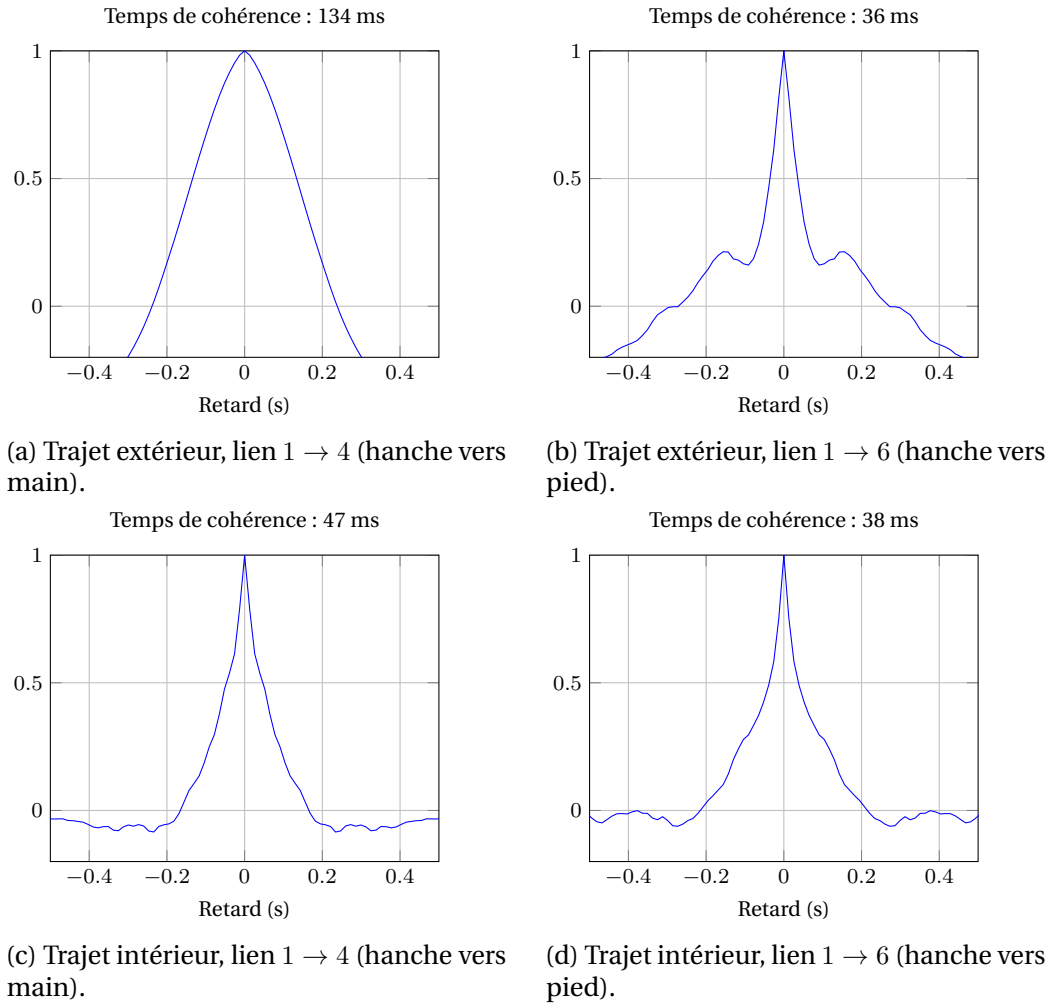


Figure 4.5 – Autocorrélation et temps de cohérence du canal pour deux liens, sur le trajet intérieur et extérieur.

s'intéresse en particulier à la variation de $g_{i,j}$ entre les échantillons $k - 1$ et k , pour déterminer le degré de prédictibilité de l'affaiblissement du lien :

$$\varepsilon_{i,j}[k] = g_{i,j}[k] - g_{i,j}[k - 1]$$

.

La densité de probabilité empirique (normalisée) de la grandeur $\varepsilon_{i,j}$ est donnée pour un lien (hanche → main gauche) sur la figure 4.6, en intérieur et en extérieur. Il est à noter un étalement très important de la distribution correspondant au trajet intérieur, avec des valeurs non négligeables au-delà de la plage $[-5, 5]$ dB, ce qui rend ce type d'environnement beaucoup plus difficile à prédire de façon efficace que

Noeuds	1	2	3	4	5	6
1	∅	84	77	134	60	36
2	86	∅	168	57	119	113
3	81	164	∅	62	118	52
4	131	46	59	∅	38	76
5	55	104	120	44	∅	38
6	38	98	55	78	37	∅

Table 4.5 – Temps de cohérence (en ms) de l'ensemble des liens, sur une réalisation du trajet extérieur.

Noeuds	1	2	3	4	5	6
1	∅	35	17	47	21	38
2	25	∅	24	18	37	27
3	16	26	∅	19	25	35
4	52	19	19	∅	31	45
5	22	40	24	33	∅	21
6	33	26	32	39	21	∅

Table 4.6 – Temps de cohérence (en ms) de l'ensemble des liens, sur une réalisation du trajet intérieur.

l'environnement extérieur. Dans le cas de réalisations pratiques de protocoles avec contrôle de puissance, il peut convenir, par exemple, de conserver une marge de sécurité, en dessous de laquelle la probabilité d'évanouissement peut entraîner une perte d'information non négligeable. Cette marge peut d'ailleurs être adaptée de façon autonome en fonction de la variabilité des liens mesurée par les nœuds au fil de l'eau.

Les tables 4.8 et 4.7 présentent la proportion de valeurs résiduelles $\varepsilon_{i,j}[k]$ inférieures en valeur absolue à 2 dB. Comme illustré dans la figure 4.6, les fortes valeurs mesurées pour le scénario extérieur appuient l'hypothèse d'une bonne prédictibilité des canaux, ce qui est beaucoup moins le cas pour un scénario intérieur. Nous étudierons l'impact de ces variations en réutilisant les données temporelles servant de terrain de validation pour des protocoles coopératifs.

4.3.2 Symétrie des liens

Si l'on considère la réalisation d'un protocole adaptatif, il peut être intéressant d'estimer la qualité d'un lien entre une source S et une destination D , en fonction du lien inverse. C'est le cas lorsque les nœuds s'appuient sur une balise émise par le puits (possible-ment relayée) pour prendre une décision de manière autonome quant au choix de relais ou à la puissance d'émission. Dans ce cas, l'hypothèse des liens symétriques est classiquement admise, et l'on peut considérer que, dans la limite de stabilité du canal, l'estimation d'un lien sera équivalente dans les deux sens.

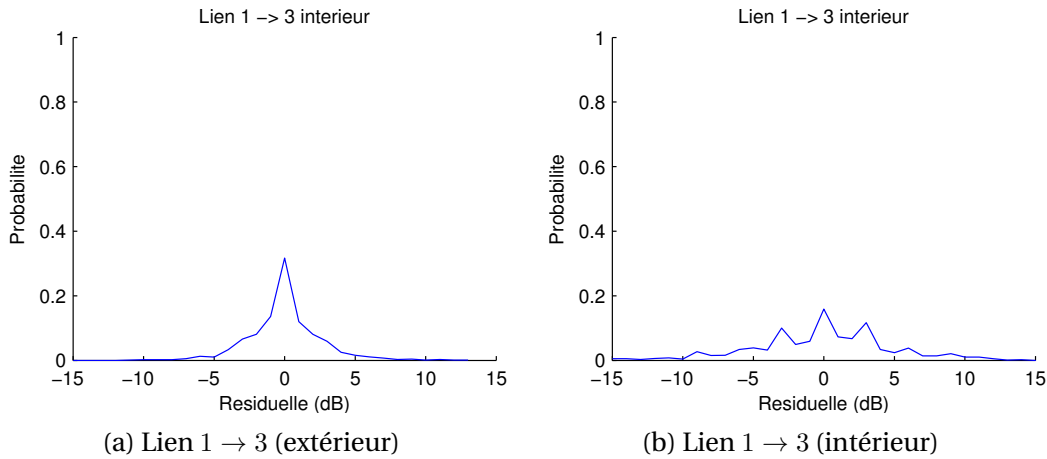


Figure 4.6 – Densité empirique de la résiduelle $\varepsilon_{i,j}$, sur le même lien en trajet extérieur et intérieur.

Or les résultats observés sur les données brutes figure 4.4 et la valeur moyenne des liens (tableaux 4.3 et 4.4) semblent faire état d'un léger décalage entre certains liens. Il convient alors d'analyser le comportement de la valeur $\varepsilon_{i,j}^s = g_{i,j}[k] - g_{j,i}[k]$, pour chaque couple de nœuds i et j .

La dispersion des valeurs de ε^s est donnée sur les figures 4.7 et 4.8. Sur ces figures, l'importance du biais de symétrie est évaluée par l'écart des points du nuage à la diagonale. On remarque très vite les différences entre les deux scénarios, le trajet en intérieur faisant état d'une bien plus grande dispersion. L'hypothèse des multi-trajets peut être mise en cause ici également, ainsi que la résolution temporelle de notre système. En effet, bien que réalisée dans un temps court, la mesure bidirectionnelle n'est pas instantanée, et dans cet environnement très soumis aux multi-trajets nous avons pu voir se réduire la stabilité du canal.

Dans une démarche similaire à celle visant à évaluer la stabilité temporelle du canal, nous pouvons évaluer la pertinence de l'hypothèse de symétrie en utilisant la même métrique que précédemment, à savoir la probabilité que la différence de symétrie $|g_{i,j}[k] - g_{j,i}[k]|$ soit inférieure au seuil de 2 dB.

Ces résultats montrent que l'hypothèse de symétrie est globalement valide sur le trajet extérieur, les valeurs étant au minimum proches de 80% (à la seule exception du lien 2 \leftarrow 4). Si les liens entre le puits et les pieds montrent un défaut de symétrie plus faible, on peut remarquer l'intérêt d'observer la métrique à deux sauts. Dans l'hypothèse où les nœuds 3 et 4 serviraient de relais aux nœuds 5 et 6, on peut remarquer une symétrie élevée sur les liens {5-3;5-4;6-3;6-4} (premier saut) et les liens {1-3;1-4} (second saut). En intérieur, les valeurs de notre métrique tendent à diminuer, notamment pour les liens directs des pieds vers la hanche, mais l'hypothèse d'une

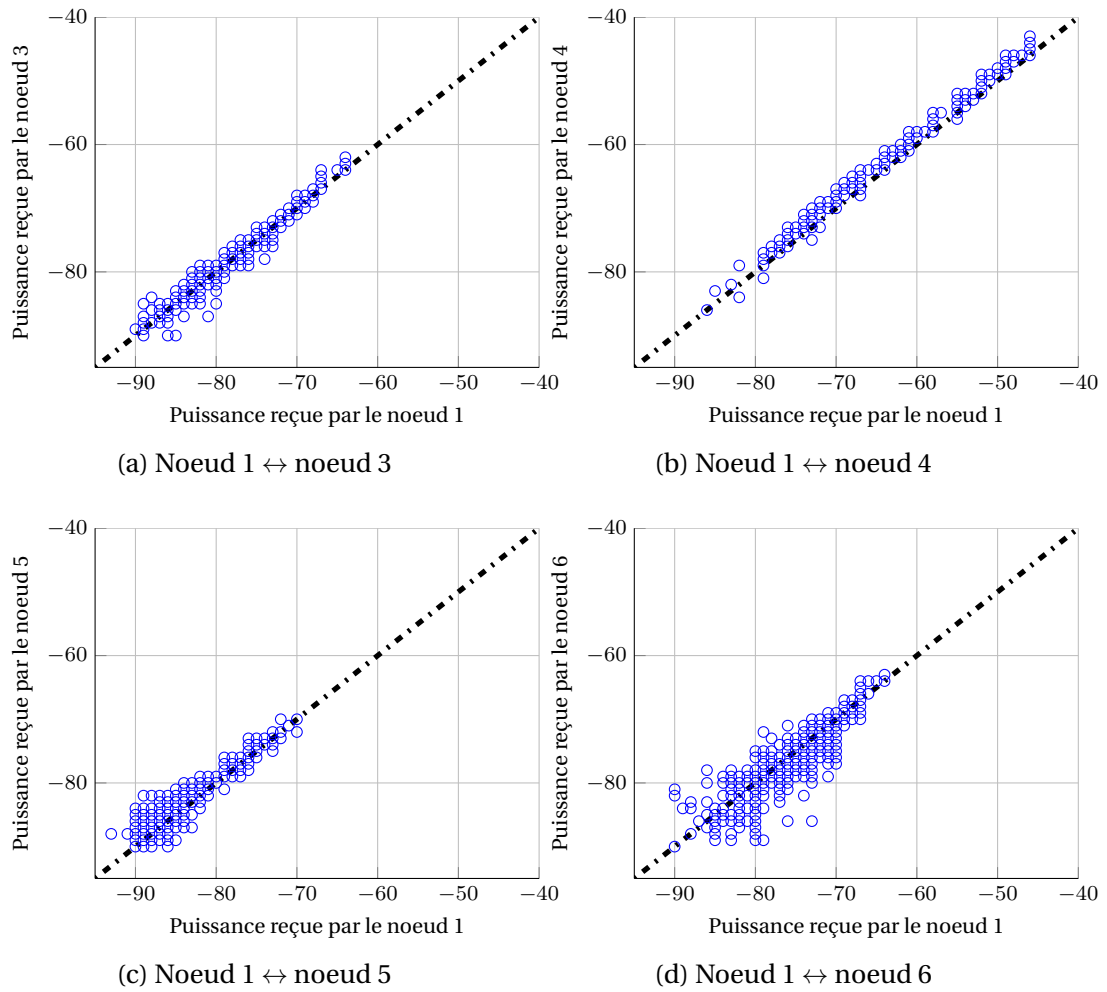


Figure 4.7 – Nuages de points, visualisant le biais de symétrie pour différents liens, sur le trajet 1, en extérieur.

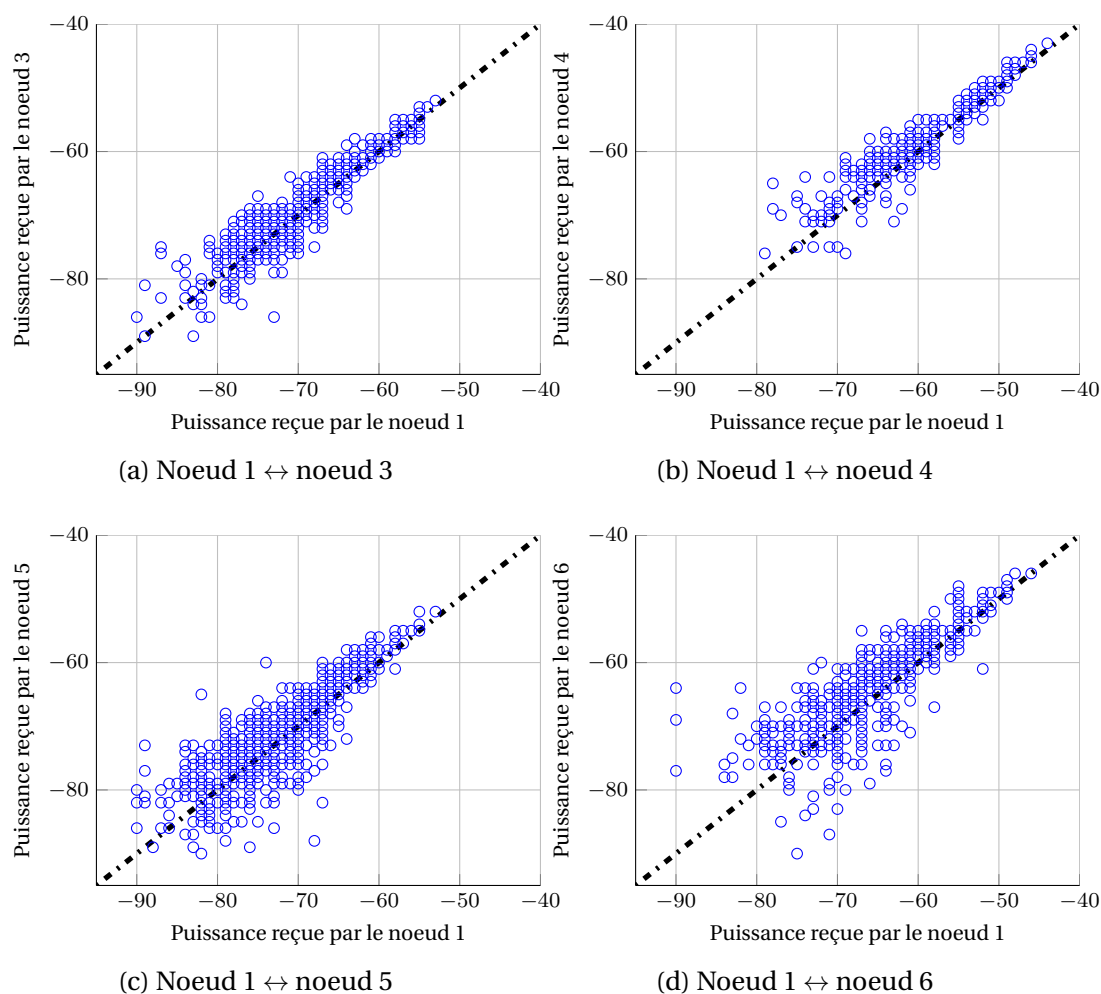


Figure 4.8 – Nuages de points, visualisant le biais de symétrie pour différents liens, sur le trajet 2, en intérieur.

4.4. Coopération et contrôle de puissance

Noeuds	1	2	3	4	5	6
1	∅	0.97	0.75	0.85	0.78	0.69
2	0.97	∅	0.73	0.70	0.79	0.75
3	0.76	0.77	∅	0.75	0.84	0.64
4	0.86	0.71	0.74	∅	0.63	0.71
5	0.72	0.79	0.84	0.69	∅	0.75
6	0.69	0.74	0.62	0.72	0.75	∅

Table 4.7 – Probabilité empirique pour la résiduelle de se retrouver à $[-2, 2]$ dB de la valeur moyenne, pour une réalisation du trajet extérieur.

Noeuds	1	2	3	4	5	6
1	∅	0.39	0.39	0.68	0.46	0.47
2	0.41	∅	0.44	0.45	0.50	0.51
3	0.40	0.42	∅	0.39	0.53	0.46
4	0.70	0.45	0.42	∅	0.48	0.51
5	0.46	0.52	0.51	0.47	∅	0.47
6	0.51	0.52	0.45	0.49	0.53	∅

Table 4.8 – Probabilité empirique pour la résiduelle de se retrouver à $[-2, 2]$ dB de la valeur moyenne, pour une réalisation du trajet intérieur.

bonne symétrie à deux sauts reste valide.

Si l'on compare ces résultats aux tableaux précédents 4.7 et 4.8, où l'on évalue la probabilité d'un faible changement d'un même lien d'une trame à l'autre, qui est quant à elle beaucoup plus faible en intérieur, on peut d'ores et déjà imaginer que de meilleures performances peuvent être obtenues grâce à une estimation bidirectionnelle du lien au plus près de la transmission.

Partant du constat, observable sur la figure 4.7, d'un décalage constant du nuage de points par rapport à la moyenne (notamment sur le lien 1-4), on peut émettre l'hypothèse d'un biais sur la symétrie, qui serait engendré par les défauts des capteurs, tant sur la puissance d'émission que sur la qualité de la mesure. Celui-ci étant constant, il peut être compensé par des mesures à long terme, grâce à la connaissance du lien dans les deux sens. Les nœuds pourront alors de manière autonome adapter leurs estimations en fonction du biais mesuré.

4.4 Coopération et contrôle de puissance

Nous avons caractérisé certains aspects pratiques des canaux BAN obtenus grâce à la plate-forme, qui permettent de mieux appréhender la conception de protocoles de transmission. Il nous est également possible de réutiliser les traces collectées afin

Noeuds	1	2	3	4	5	6
1	\emptyset	0.92	0.97	0.91	0.79	0.79
2	0.92	\emptyset	0.94	0.67	0.79	0.86
3	0.97	0.94	\emptyset	0.97	0.94	0.87
4	0.91	0.67	0.97	\emptyset	0.93	0.85
5	0.79	0.79	0.94	0.93	\emptyset	0.89
6	0.79	0.86	0.87	0.85	0.89	\emptyset

Table 4.9 – Probabilité empirique pour la différence $g_{i,j}[k] - g_{j,i}[k]$ de se retrouver à $[-2, 2]$ dB de la valeur moyenne, pour une réalisation du trajet extérieur.

Noeuds	1	2	3	4	5	6
1	\emptyset	0.84	0.71	0.86	0.59	0.44
2	0.84	\emptyset	0.94	0.82	0.72	0.64
3	0.71	0.94	\emptyset	0.94	0.84	0.67
4	0.86	0.82	0.94	\emptyset	0.89	0.78
5	0.59	0.72	0.84	0.89	\emptyset	0.94
6	0.44	0.64	0.67	0.78	0.94	\emptyset

Table 4.10 – Probabilité empirique pour la différence $g_{i,j}[k] - g_{j,i}[k]$ de se retrouver à $[-2, 2]$ dB de la valeur moyenne, pour une réalisation du trajet intérieur.

d'évaluer les performances d'algorithmes coopératifs et/ou mettant en jeu un contrôle de la puissance d'émission. En effet, dans le cadre des mesures effectuées, nous avons choisi d'émettre à la puissance maximale de 3 dBm, afin de bénéficier de la plus grande plage de mesure possible, évitant ainsi au maximum les déconnexions et l'absence de données, pour chaque lien. Nous pouvons déduire de ces mesures les valeurs du maillage complet dans le cas où les nœuds fonctionneraient à puissance variable, en faisant varier artificiellement la valeur des canaux a posteriori.

4.4.1 Variation de la puissance d'émission

Nous avons vu de fortes disparités entre les niveaux moyens des différents liens, ce qui laisse à penser qu'une baisse de la puissance d'émission aurait des effets très différents sur les performances des liens en termes de probabilité de succès ou d'échec des transmissions. Les données collectées sur les deux scénarios nous donnent la matrice G dont chacun des éléments $g_{i,j}[k]$ correspond à la mesure de l'ED reçue par le nœud i depuis le nœud j durant la trame k . Nous rappelons que $g_{i,j} \geq g_{min}$ avec $g_{min} = -91$ dBm. Nous pouvons alors déduire les pertes qu'entraînerait une baisse de la puissance d'émission P_{tx} (globale ou individuelle) en soustrayant la différence par rapport à la puissance maximale P_{max} (ici 3 dBm), soit $G^P = G - |P_{max} - P_{tx}|$. Les pertes sont alors déduites en éliminant les éléments $g_{i,j}^P[k] < g_{min}$, qui correspondent alors à des paquets perdus, le signal étant trop faible pour être décodé.

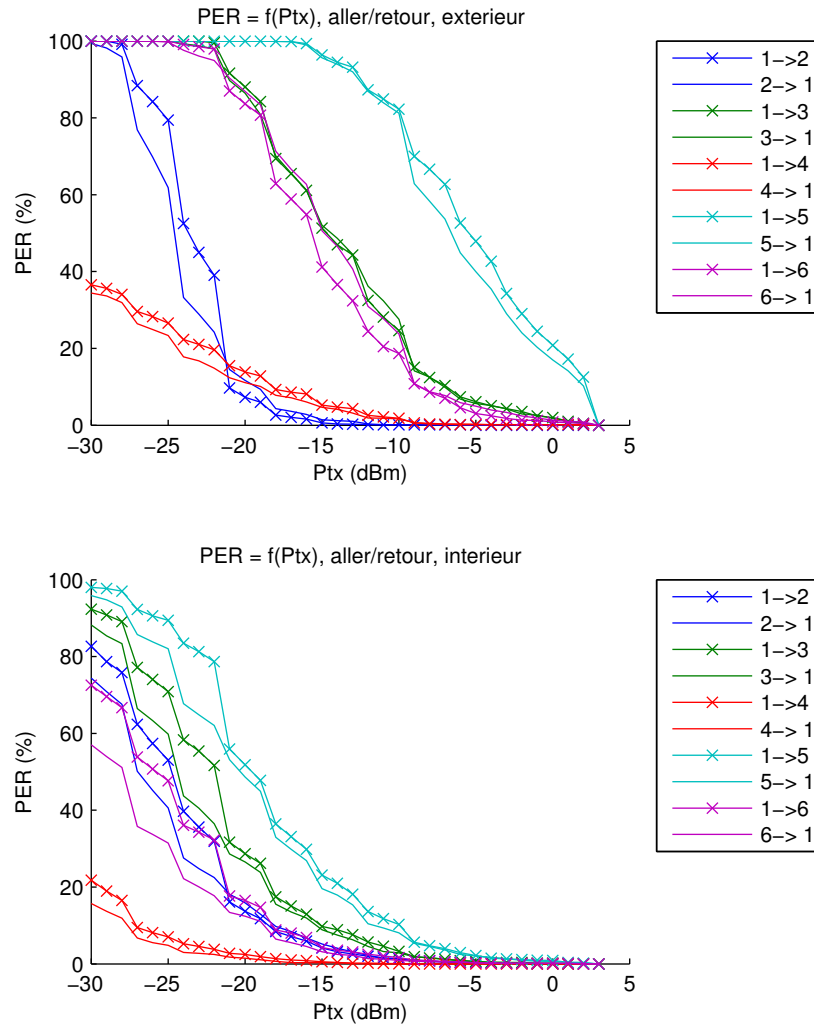


Figure 4.9 – Estimation du PER entre les différents nœuds et le coordinateur (nœud 1), en fonction de la puissance d'émission P_{tx} , en extérieur, puis en intérieur.

La figure 4.9 présente pour chaque lien (aller et retour) impliquant le nœud 1, le comportement du PER estimé en fonction de la puissance d'émission, lors d'une réalisation de chaque trajet. La puissance varie ici sur l'intervalle $[-30;3]$ dBm, la borne inférieure est en réalité en-deçà de la puissance minimale possible sur la radio Atmel (-17 dBm). L'estimation présentée ici ne tient pas compte du fait que le seuil de sensibilité de la radio est en réalité situé à -101 dBm, ainsi dans les mesures que nous avons réalisées les paquets reçus à -91 dBm (valeur minimale mesurable) ont en réalité un niveau de puissance situé dans l'intervalle $[-101;-91]$. Ceci constitue une imprécision supplémentaire, mais l'approche reste néanmoins valide. La baisse de la puissance d'émission génère simplement des matrices de canaux constituant en quelque sorte un cas défavorable de transmission, où la probabilité de décodage d'un

paquet de puissance inférieure au seuil de mesure est nulle, ce qui n'est pas tout à fait le cas en réalité.

On peut néanmoins constater que l'effet de la baisse de puissance est assez immédiat en extérieur, d'abord pour le lien avec le pied gauche (nœud 5), dont l'erreur atteint bien avant les autres des proportions très importantes. Pied droit et main gauche (nœuds 3 et 5) ont un comportement très similaire, et les deux liens les plus stables (torse et main droite, 2 et 4) conservent un taux d'erreur faible en-deçà de -10 dBm. Dans la plupart des cas, les courbes présentent des formes similaires, avec des valeurs de puissance en-deçà desquelles le PER augmente très rapidement. Sur le trajet intérieur, le comportement est beaucoup plus homogène; les différences mises en avant en extérieur sont bien moindres, et le PER augmente de façon moins brutale et plus tardivement à mesure que baisse la puissance d'émission.

On retrouve logiquement dans ces courbes, la traduction au niveau des couches réseau supérieures (succès ou non du décodage) des tendances observées dans les sections précédentes sur les canaux dans les deux scénarios. La limitation de la puissance d'émission, si elle peut s'avérer nécessaire, notamment pour diminuer le rayonnement global du réseau ou améliorer la cohabitation de plusieurs BAN dans un même espace, entraîne rapidement une chute des performances du réseau. Il devient alors utile d'étudier l'apport pouvant être fourni par des mécanismes de coopération dans le but de réduire l'énergie rayonnée tout en assurant une fiabilité satisfaisante des transmissions.

4.4.2 Algorithmes coopératifs

Une piste possible de coopération adaptée aux applications visant des capteurs industriels tels que ceux utilisés dans les BAN, est l'utilisation de protocoles dynamiques de relaying au niveau MAC. Ils consistent, lorsqu'un lien entre une source et une destination est peu fiable, voire absent, à utiliser un troisième nœud pour relayer l'information émise par la source (en incluant éventuellement ses propres informations) durant un temps de parole réservé. La diversité spatiale apportée par le relaying doit permettre de profiter, si le lien direct est mauvais (en raison du masquage lié au mouvement, par exemple), d'un autre lien à deux sauts dont l'état courant de canal sur les deux branches est meilleur et donc d'améliorer la fiabilité globale du réseau.

Le problème principal posé par ce type de protocole est précisément le choix des relais, compte tenu de la dynamique des canaux. Il est nécessaire en effet de proposer des méthodes permettant d'assurer la fiabilité des transmissions, tout en optimisant l'énergie rayonnée par le réseau. Le cas d'un relaying statique utilise des relais prédéterminés au cours d'une phase d'initialisation consistant à estimer les probabilités de succès des différents liens. Cette méthode, proposée notamment par [Hara et al.,

2011], souffre d'un manque de flexibilité, compte tenu de la multiplicité des scénarios que peut couvrir le BAN. Des phénomènes comme des changements de posture ou d'environnement peuvent entraîner une baisse des performances et une remise en cause les choix de relais, c'est pourquoi la communauté s'oriente davantage vers des protocoles dynamiques, s'adaptant à l'état courant des canaux [Dong and Smith, 2014, Maman and Ouvry, 2011].

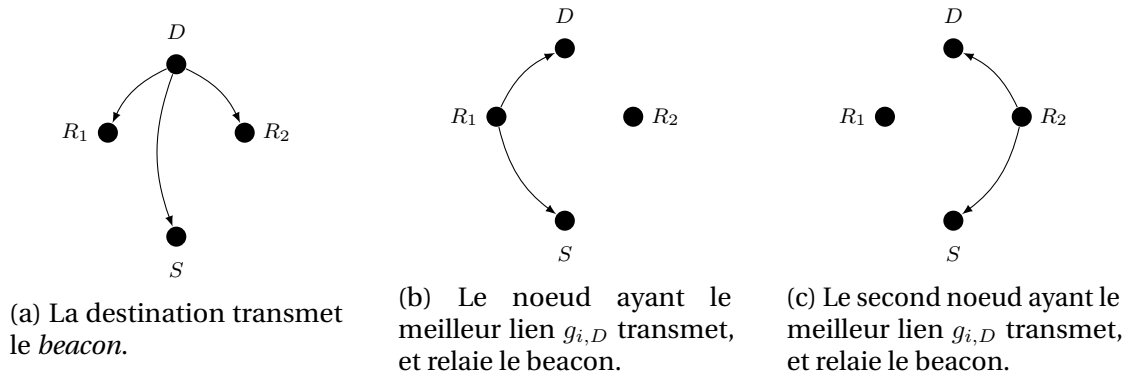


Figure 4.10 – Protocole avec relayage de *beacon* pour propager les états de canaux vers le noeud S , ayant un canal faible avec la destination.

Dans ce cas, une méthode possible consiste à choisir les relais pour le lien montant (noeud vers puits) en fonction de l'état courant des canaux descendants (puits vers noeud, avec et sans relais). La connaissance des canaux descendants peut être réalisée en pratique par l'émission d'une balise émanant du puits, elle-même retransmise ensuite par des relais potentiels (incluant la puissance du lien), ce qui est illustré par la figure 4.10. A l'issue de la phase *beacon*, le noeud S possède la connaissance de l'ensemble d'informations $g_{i,D}$, $g_{i,S}$ et $g_{D,S}$. Connaissant ces informations, les noeuds ont alors la capacité d'élire le relais assurant le lien le plus fort de bout en bout, ou de choisir le chemin direct si celui-ci est suffisamment élevé en se signalant, soit au relais, soit directement au puits durant un temps de parole dédié. La méthode de relayage de la balise (*beacon*) est illustrée par la figure 4.10, pour laquelle deux relais potentiels sont préalablement identifiés pour communiquer entre la source et la destination. L'ordre d'émission des relais peut être déterminé par la balise émanant du puits, en fonction de l'état des liens durant la trame précédente.

Dans une approche comme celle donnée par [Maman and Ouvry, 2011], les choix de relais ne tiennent pas compte de la puissance mesurée des canaux, et les noeuds élisent pour relais la première balise reçue. Un algorithme conjoint de coopération et d'adaptation de puissance pour la communication dans les BAN a été récemment proposé par [Dong and Smith, 2014], qui quant à lui prédit le lien courant à l'instant $g_{i,j}[k]$ à partir de son état précédent $g_{i,j}[k-1]$. Il consiste, compte tenu d'un ensemble \mathcal{T}_{range} de puissances disponibles et de l'état de canal entre deux noeuds $g[k-1]$, à transmettre à l'instant k avec une puissance $P_{tx}[k]$ telle que $P_{tx}[k] > R_{x_{sens}} - g[k-1] +$

$offset, P_{tx}[k] \in T_{xrange}$. La variable $offset$ est une valeur supposée fixe permettant de légèrement surévaluer la prédiction. Elle peut être utilisée pour se prémunir des variations observées d'une trame à l'autre, telles qu'exposées dans la section 4.3.1. Dans notre cas, Rx_{sens} est la puissance minimale pouvant être mesurée par la radio (ici -91 dBm).

Les travaux de [Dong and Smith, 2014] centralisent le choix de relais en fonction des qualités de liens reçues par le coordinateur lors de la trame précédente, et l'ordre est transmis aux nœuds dans la balise. Toutefois, comme nous avons pu l'observer, la stabilité du canal BAN peut s'avérer très réduite, notamment en intérieur, et selon la fréquence à laquelle sont émises les trames, l'estimation des canaux peut varier considérablement entre les instants $k - 1$ et k .

La figure 4.11 illustre le taux de pertes sur chaque lien avec le nœud 1 pour un protocole coopératif mettant en œuvre une prédiction de puissance basée sur les valeurs des canaux reçues durant la trame $k - n$, $n \in [1; 15]$, soit entre 13 et 195 ms. La valeur d'offset est fixée ici à 4 dB. Pour les nœuds 5 et 6, la perte est exprimée sur le lien total (relayé ou non) avec le nœud 1. En intérieur, seuls deux liens conservent un taux d'erreur inférieur à 5 %, le nœud 2, non relayé, bénéficiant d'une très grande stabilité avec le nœud 1 central, et le nœud 5, pour lequel l'utilisation du relais 3 est prépondérante. L'étude du tableau 4.7 indique par ailleurs une très grande stabilité du lien 5-3. Pour les trois autres liens, du fait de la stabilité des canaux, on remarque en revanche que la confiance dans l'information de puissance à l'instant $k - n$ se dégrade rapidement à mesure que n augmente. Ainsi dès 40 ms ($n = 3$), 3 liens affichent des pertes autour de 5 à 10%.

En intérieur, les dégradations sont beaucoup plus rapides, ce qui est attendu compte tenu de la stabilité beaucoup plus réduite de l'ensemble des canaux. Les nœuds 2 et 3 présentent dès le départ un taux de perte supérieur à 10 %, seuil que les autres liens franchissent également rapidement, à l'exception du nœud 5, pour lequel l'apport du relayage semble être le plus efficace.

C'est pourquoi il peut être judicieux, en fonction de la fréquence à laquelle sont émises les trames, de privilégier un échange bi-directionnel tel que décrit par la figure 4.10 afin d'estimer la qualité des liens et d'effectuer le choix de relais de manière distribuée au plus près de la transmission des données. Par cette méthode, chaque nœud nécessitant un relais récupère à l'instant k par une propagation de balise la connaissance des liens à deux sauts impliquant les relais potentiels tel que $l_i = (\min(g_{i,D}, g_{i,S}))$. Les nœuds prennent alors la décision d'élire le relais $r = \arg \max_{i \in \{R1, R2 \dots R_N\}} (l_i)$. Ils peuvent ensuite se signaler au relais concerné durant un slot d'émission réduit, avant de transmettre leurs données durant un temps de parole réservé, avec une puissance d'émission prédite de façon similaire au protocole centralisé.

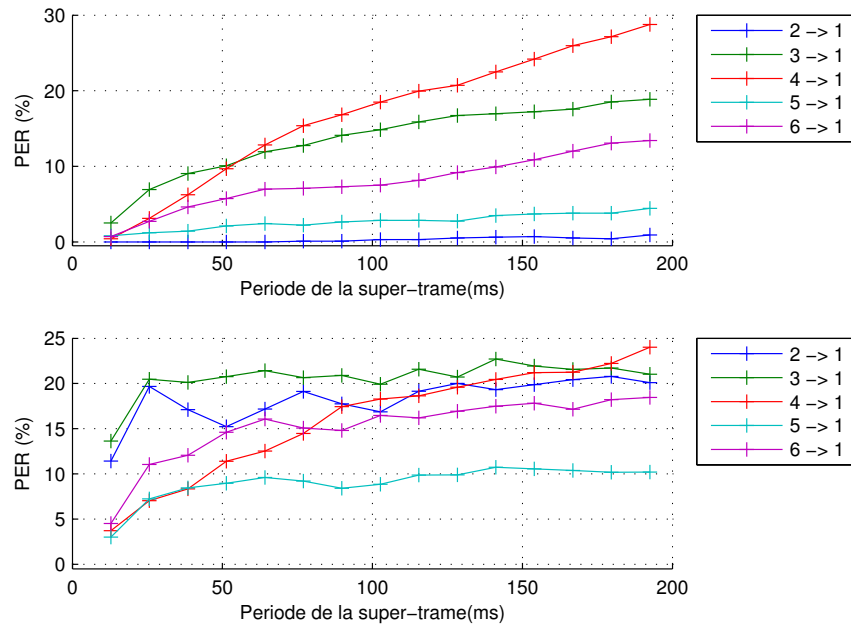


Figure 4.11 – Effet de la période de la super-trame sur les performances de l’algorithme centralisé de prédiction de puissance à partir de la réception à l’instant $k - n$, $n \in [1; 15]$, soit une période comprise entre 13 et 195 ms.

Sans entrer dans les considérations de conception d’une couche MAC complète, nous proposons de comparer les performances du protocole centralisé avec celles du protocole distribué, sur deux aspects : le taux d’erreur moyen par lien, ainsi que l’erreur de prédiction sur la puissance d’émission. Celle-ci est définie comme la différence $\varepsilon_P = P_{tx,i}[k] - P_{ideal,i}[k]$ entre la puissance d’émission prédite $P_{tx,i}[k]$ pour chaque nœud i à l’instant k , et la puissance minimale $P_{ideal,i}[k]$ assurant le décodage de l’information.

La figure 4.12 illustre les performances de ces deux protocoles sur les données acquises lors de trois réalisations de chaque trajet. Pour le protocole centralisé, on considère une prédiction entre les instants $k - 4$ et k , soit une période d’environ 50 ms. Chaque point de la figure correspond à un trajet, la forme du point distingue le protocole mis en œuvre. Une nette dégradation pour les deux protocoles peut être observée en intérieur, résultant à la fois de la stabilité réduite et d’une plus grande incertitude sur la symétrie instantanée des liens. Ensuite, on peut remarquer l’intérêt d’une prédiction de la puissance d’émission par symétrie au plus près de la transmission. Tout d’abord, cette méthode est indépendante de la période d’émission des trames, donc la durée entre l’estimation des liens et l’émission des données est constante. Si des performances similaires avec l’algorithme centralisé peuvent être déduites de la figure précédente pour des périodes courtes, on peut noter ici de nettes différences sur les pertes en extérieur, pour une période de trame d’environ 50 ms, ce qui est inférieur à

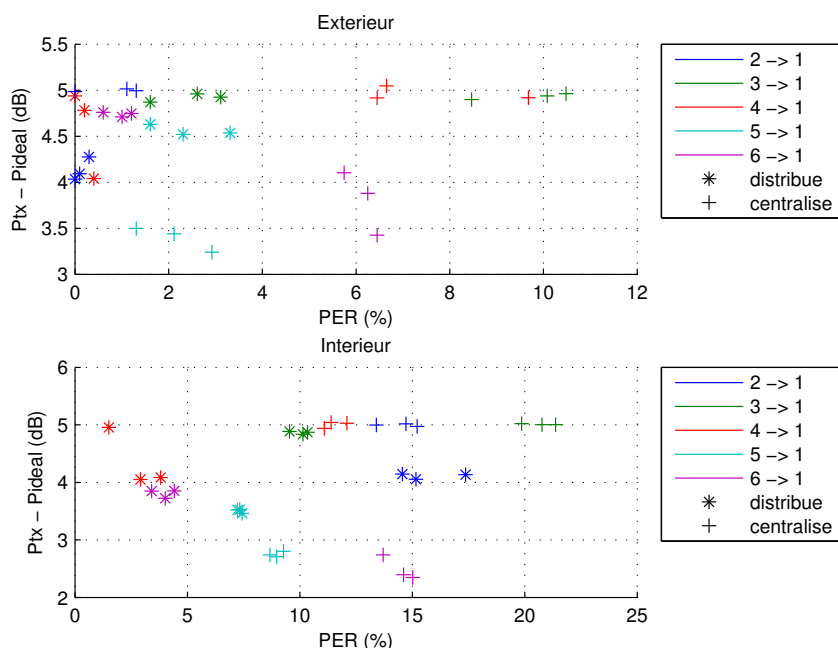


Figure 4.12 – Comparaison des performances du contrôle de puissance sur les protocoles distribué et centralisé, dans les deux environnements. Le taux d’erreur de chaque lien est mis en relation avec l’erreur moyenne de prédiction. Chaque point de la figure correspond à une réalisation d’un trajet, la forme du point différencie le protocole.

la plupart des temps de cohérence précédemment mesurés.

En intérieur, les liens moins stables qui ne bénéficient pas du relayage (nœuds 2 et 3) voient leur PER considérablement augmenter. De façon générale, les performances sur le taux d’erreur des deux protocoles peuvent être améliorées en adaptant la valeur d’offset de façon dynamique, en fonction du taux d’échec des transmissions, qui peut être également transmis dans la balise. Ainsi, les nœuds pourront adapter cette valeur minimale aux conditions de stabilité de l’environnement courant.

Nous comparons dans les tableaux 4.11 et 4.12 les puissances d’émission moyennes par nœud données par les deux protocoles, permettant d’atteindre respectivement des taux d’erreur par lien de 5% et 1%, sur une réalisation de chaque trajet. La période de la trame pour le protocole centralisé est là encore de 52 ms.

La comparaison proposée dans ces deux tableaux indique globalement que l’apport de la mesure bi-directionnelle en terme de puissance peut être plus important dès lors que l’on souhaite atteindre un taux de pertes faible (inférieur à 1%), et particulièrement pour les liens les moins stables, à la fois en intérieur et en extérieur. L’ensemble des résultats de cette partie tend à montrer qu’une méthode conjointe de relayage et d’adaptation de puissance est applicable, tout en assurant de bonnes performances

Noeud	2	3	4	5	6	Moyenne
Centralisé, PER < 5 %	-19.39	-5.57	-22.66	-14.81	-15.30	-15.54
Distribué, PER < 5 %	-19.39	-8.43	-24.05	-13.82	-19.16	-16.97
Centralisé, PER < 1 %	-16.39	-1.19	-20.74	-5.86	-7.32	-10.30
Distribué, PER < 1 %	-19.39	-2.85	-23.73	-10.84	-16.30	-14.62

Table 4.11 – Comparaison des puissances d’émission moyennes (dBm) pour chaque nœud garantissant des taux d’erreur inférieurs à 5% et 1% obtenues pour les deux protocoles testés, en extérieur.

Noeud	2	3	4	5	6	Moyenne
Centralisé, PER < 5 %	-14.42	-7.81	-24.30	-15.61	-16.04	-15.64
Distribué, PER < 5 %	-14.42	-12.64	-25.70	-17.57	-22.60	-18.59
Centralisé, PER < 1 %	-7.58	-1.69	-21.22	-9.65	-13.04	-10.63
Distribué, PER < 1 %	-7.58	-5.94	-23.79	-14.62	-18.01	-13.99

Table 4.12 – Comparaison des puissances d’émission moyennes (dBm) pour chaque nœud garantissant des taux d’erreur inférieurs à 5% et 1% obtenues pour les deux protocoles testés, en intérieur.

en terme de fiabilité des liens, qu’ils soient directs ou à deux sauts. Comme nous l’avons précisé, la réalisation complète d’une couche MAC n’est pas considérée ici, et nous n’abordons que l’aspect visant à calculer au plus juste les puissances émises. Une couche MAC complète visera à minimiser la part d’énergie consommée par le protocole coopératif, notamment le surcoût énergétique induit par l’estimation bi-directionnelle.

4.5 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre un ensemble de mesures des canaux des BAN, obtenues grâce à une plate-forme permettant la collecte d’un maillage dynamique complet. Pour faire suite au chapitre précédent, où des aspects de certains liens off-body ont été mis en évidence, nous avons complété dans ce chapitre des aspects pratiques des canaux des BAN, tels qu’ils peuvent être mesurés par des capteurs industriels. Nous avons ensuite proposé de réutiliser les traces obtenues afin d’estimer l’impact sur les transmissions de protocoles coopératifs, permettant de limiter la puissance d’émission par des méthodes de prédiction simple. Un autre résultat orienté vers la modélisation des canaux est présenté dans la thèse de Paul Ferrand. Celui-ci fait état de l’aspect corrélé des différents liens, et montre qu’il n’est pas statistiquement correct de considérer une matrice de corrélation globale pour un scénario particulier (marche en extérieur, par exemple), mais qu’en revanche celle-ci est relativement stable à court terme.

Parmi les objectifs étant appelés à être développés à la suite de ces mesures, il y a notamment l'intégration des traces à un simulateur de réseau à événements discrets, tel que WSNNet [wsn, 2014]. L'intégration des mesures à ce simulateur peut permettre notamment une évaluation de protocoles au niveau des couches supérieures (MAC et NET), et de prendre en considération la consommation d'énergie du réseau, ce qui étend les estimations simples données dans la dernière section de ce chapitre. De plus, notre plate-forme, de par sa flexibilité complète, amène à considérer l'étoffement des scénarios applicatifs des BAN, en étant réutilisée pour constituer une base de données composée de multiples scénarios. Dans le cadre du projet ANR Cormoran [cor, 2014], qui vise à la localisation et à la navigation de groupe, la plate-forme a été étendue, incluant jusqu'à 16 nœuds, pour une période de mesure d'environ 25 ms. Inclue dans une campagne visant à confronter plusieurs types de mesures (incluant des nœuds UWB et un système vidéo de capture de mouvement), avec un grand nombre de scénarios incluant la cohabitation multi-BAN. Les figures 4.13 et 4.14 tirées d'une publication des premiers résultats [Denis et al., 2014] présentent des premiers résultats de mesure on-body et off-body. Ces mesures seront à la fois utiles pour établir des stratégies de communication adaptées et permettront une estimation des résultats de positionnement pouvant être obtenus par la technologie radio, grâce à la validation de terrain apportée par le positionnement vidéo.

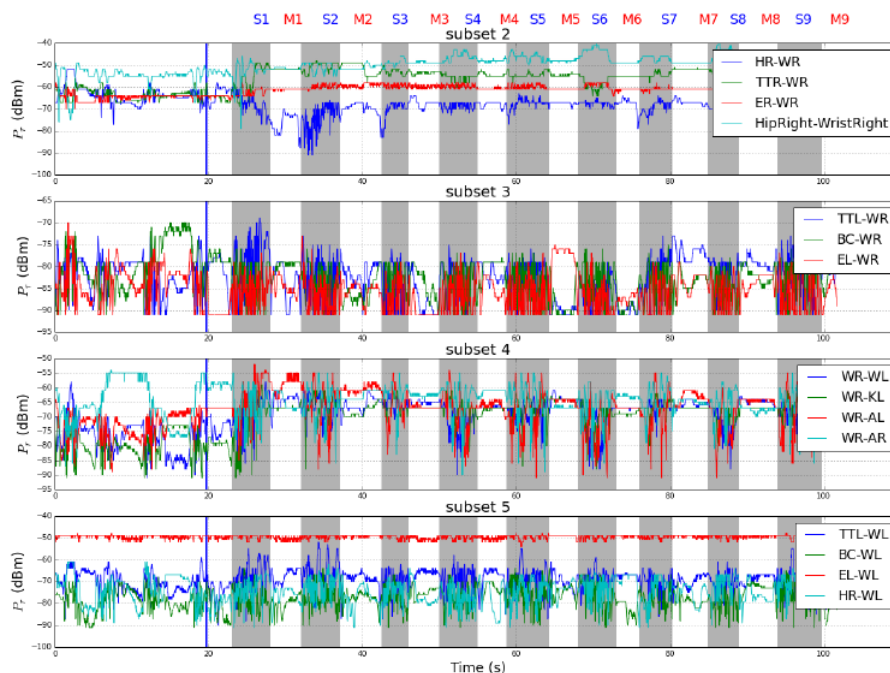


Figure 4.13 – Extrait de mesures on-body brutes obtenues lors de la campagne du projet ANR Cormoran [cor, 2014], pour quatre sous-ensembles de nœuds .

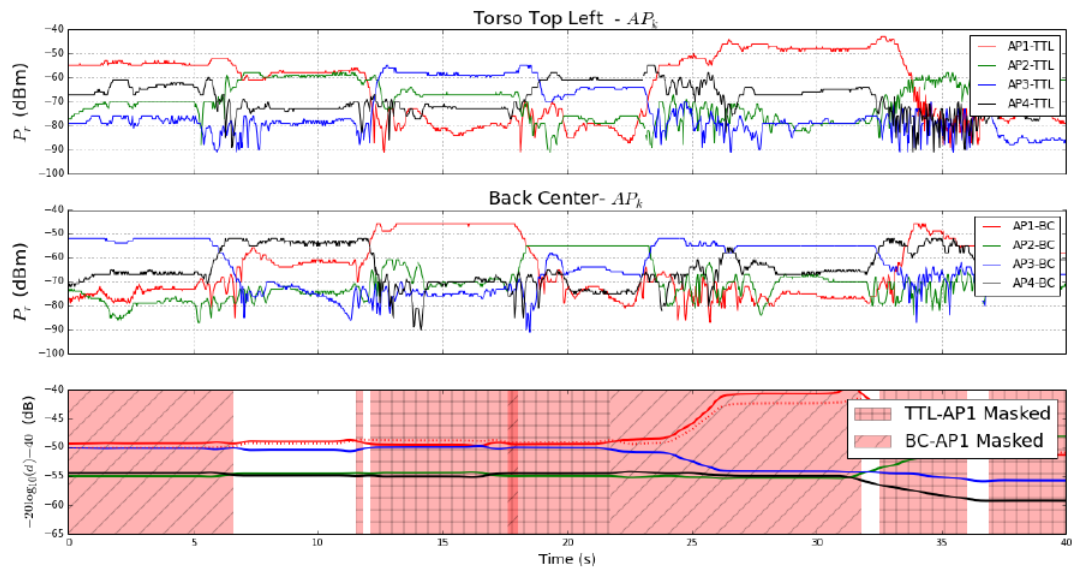


Figure 4.14 – Extrait de mesures off-body obtenues lors de la campagne du projet ANR Cormoran [cor, 2014], quatre nœuds étant utilisés comme points d'accès fixes répartis dans la salle.

Collecte de données issues de réseaux denses et mobiles

Partie II

5 Compléments à l'état de l'art

Sommaire

5.1	Introduction	81
5.2	Collecte d'information dans les réseaux mobiles	82
5.3	Localisation et mesure de distance pour les réseaux de capteurs	84
5.4	Consensus distribué	87
5.5	Applications sportives	88
5.5.1	Cas du cyclisme	88
5.5.2	Connectivité dans les réseaux multi-BAN sportifs	90
5.6	Nouveau contexte applicatif	91

5.1 Introduction

Après avoir apporté des éléments sur différents aspects de la collecte d'informations issues d'un ensemble de capteurs embarqués sur un individu, nous abordons dans cette seconde partie un aspect complémentaire visant la communication au sein de groupes denses et mobiles. Si l'aspect individuel vise à centraliser de manière efficace des informations vers un concentrateur assurant l'interface avec le réseau de collecte globale, on cherchera, dans le cas de réseaux *multi-BAN*, à limiter les effets nocifs liés à la cohabitation de plusieurs réseaux BAN dans un espace restreint, tels que les interférences ou le masquage engendré par la présence de personnes pouvant être

vues comme autant d'obstacles supplémentaires aux communications.

Si cette approche individuelle de coexistence constitue actuellement un champ de recherche actif [Wang et al., 2013, Nhan et al., 2014], nous nous intéressons dans cette seconde partie à une construction d'informations auxquelles chacun des nœuds mobiles d'un réseau multi-BAN va contribuer. En d'autres termes, nous recherchons une approche visant à ce que l'ensemble des nœuds, par leur collaboration, participent à faire émerger du réseau des informations permettant d'obtenir une vue globale d'un événement, à travers le suivi de *groupes* possédant des propriétés communes.

L'objectif est de détecter la structure topologique de réseaux vus de façon générale comme des flottes d'agents mobiles évoluant dans la même direction. Motivés par une application de localisation et de suivi en temps réel de pelotons cyclistes lors de compétitions internationales, nous apportons dans ce chapitre une vue générale des communications dans les réseaux denses et mobiles, ainsi que des techniques de localisation proposées pour les réseaux de capteurs sans fils. Les problèmes posés par des méthodes nécessitant des échanges conséquents de messages ou une organisation complexe du réseau nous amènent à considérer la notion de *consensus*, grâce à laquelle il est possible de construire et partager des informations communes à un ensemble de nœuds de façon distribuée, en évitant une structure complexe du réseau.

Afin de situer le contexte applicatif, une sélection de travaux visant des applications liées au cyclisme est également présentée, ainsi que des exemples de réalisations et d'analyse de réseaux sportifs denses et mobiles lors de déploiements expérimentaux à large échelle. Nous apportons enfin des précisions concernant le cadre expérimental général développé dans cette seconde partie et les adaptations de la plate-forme pour ces nouveaux objectifs.

5.2 Collecte d'information dans les réseaux mobiles

Un réseau multi-BAN tel qu'envisagé dans l'objectif d'application qui nous concerne s'inscrit dans le cadre général des réseaux mobiles, pour lesquels les topologies et les connectivités sont amenées à évoluer au cours du temps. En effet, de par sa nature et les besoins auxquels on souhaite qu'il réponde, un tel réseau peut être vu comme un cas particulier de réseau ad-hoc mobile, en anglais *Mobile Ad-hoc Network* (MANET) ou de réseau tolérant aux délais, en anglais *Delay Tolerant Network* (DTN).

A la différence du BAN individuel, un MANET peut être défini comme un ensemble d'agents mobiles pouvant s'organiser de manière autonome et décentralisée afin d'assurer la connectivité du réseau et le transit des informations. Pouvant atteindre des échelles considérables (dans notre cas plusieurs centaines de nœuds), ces réseaux

sont amenés à être spatialement étendus, et nécessitent des protocoles de routage multi-saut pour la collecte d'informations [Akyildiz et al., 2002].

Contrairement aux réseaux statiques, du fait de la mobilité, les liens entre les nœuds évoluent au cours du temps, de ce fait des méthodes doivent être mises en œuvre afin de s'adapter aux changements de topologie et maintenir des routes d'information valides. Une importante littérature s'est développée sur les problématiques liées aux MANET depuis plus de 20 ans, proposant de nombreuses solutions, notamment la découverte des routes et la transmission à la demande ou le routage basé sur les positions géographiques [Kumar et al., 2010]. Une organisation hiérarchisée de la topologie sous forme de *clusters*, notamment pour les réseaux denses, et également possible [Shayeb et al., 2011]. Les clusters peuvent être vus comme des sous-ensembles distincts de nœuds, interconnectés via des nœuds *leaders*, élus de manière distribuée. De telles méthodes permettent de mieux répartir les charges et de prolonger la vie du réseau, et de bénéficier, dans le cas de réseaux denses, par exemple, d'une agrégation de données spatialement corrélées afin de limiter la redondance des informations collectées. Toutefois, on imagine facilement que la maintenance de telles structures en situation de très forte mobilité, ou des liens peu fiables peut s'avérer complexe.

Si les MANET cherchent de façon permanente à maintenir les routes au sein du réseau, la classe des réseaux DTN part du principe que les connexions peuvent être soumises à des interruptions, et que les données transitant sur le réseau doivent pouvoir attendre d'être transmises de façon opportuniste lors du rétablissement des connexions [Jones and Ward, 2006]. Ces réseaux sont, de par leur nature, tolérants aux délais, c'est-à-dire que la durée pour qu'une information atteigne sa destination peut être considérable. L'évacuation de données individuelles dans les DTN est adressée par des méthodes de routage épidémique, ou plus efficacement par des méthodes de type *Spray-and-Wait*, où un nombre limité de copies d'un message sont transmises de proche en proche, limitant la surcharge de communication [Spyropoulos et al., 2005].

Plus récemment, un protocole hybride comme HYMAD [Whitbeck and Conan, 2010], destiné aux réseaux denses et dynamiques, propose de combiner les méthodes de collecte des DTN et des MANET, en considérant les réseaux mobiles comme plusieurs sous-ensembles de MANET, interconnectés de façon intermittente. HYMAD met en œuvre une constitution périodique de groupes de manière distribuée, autorisant un diamètre maximal pour chacun d'entre eux. Les nœuds à la frontière de deux groupes sont également identifiés, ceux-ci ont accès à la composition des deux groupes. Un routage de l'information de type MANET est réalisé à l'intérieur des groupes, tandis que la communication inter-groupes suit les principes des DTN, en limitant les copies des messages à l'intention de chaque groupe.

Une méthode comme celle-ci peut être intéressante pour notre problème applicatif, où l'on suppose de fortes connectivités au sein des groupes, ainsi que des phénomènes

de séparation ou de fusion, et des connexions potentiellement interrompues, entre les groupes mobiles et les points d'accès, mobiles également. Les auteurs font également état de meilleures performances en situation de forte densité. La composition des groupes est néanmoins très dépendante ici de l'ordre des transmissions durant la phase de construction, et conduit à des topologies très différentes d'une période à l'autre. De plus, si l'approche DTN est bien adaptée à des modes de connexion opportunistes et supporte les déconnexions, une collecte orientée vers la diffusion d'informations en direct entraîne une rapide obsolescence des données, et l'on pourra privilégier des méthodes de collecte périodique ou à la demande. Une approche de type DTN peut être néanmoins intéressante dans le cas où l'on souhaite conserver un ensemble continu d'informations, pour un usage a posteriori.

De manière générale, les méthodes de collecte d'informations s'appuient sur des a priori quant à la connectivité et à la mobilité des réseaux, et cherchent à établir une structure afin d'organiser un routage efficace d'informations individuelles. La proposition d'une collecte d'information structurée dans un réseau multi-BAN très dense et très mobile, et donc très enclin au masquage et aux interférences, peut s'avérer hasardeuse en l'absence de modèles de mobilité et de propagation adéquats. A l'inverse, nous chercherons dans un premier temps pour notre problème à exprimer de façon synthétique et non hiérarchisée la topologie physique globale du réseau à partir de critères de distance, et à faire en sorte que l'information soit immédiatement disponible pour les puits, quel que soit leur point d'entrée au réseau.

5.3 Localisation et mesure de distance pour les réseaux de capteurs

Dès lors que l'on s'intéresse à un quelconque problème de localisation, l'idée du GPS semble être la première option à considérer [Hofmann-Wellenhof et al., 1993]. Ce système, basé sur la réception de signaux issus de plusieurs satellites en orbite terrestre, permet de reconstituer les coordonnées absolues du récepteur en tout point du globe. De nombreux produits sont disponibles sur le marché, facilement intégrables et suffisamment précis pour de nombreuses utilisations, la précision fournie par les puces GPS à usage civil étant généralement de l'ordre de quelques mètres. Néanmoins, l'usage du GPS a tendance à être limité dans les applications de réseaux de capteurs, en raison d'un coût relativement élevé, d'une couverture parfois incertaine (environnement urbain dense ou intérieur, conditions météorologiques...), ou d'une consommation énergétique considérable. A titre d'exemple, la fiche technique du composant GPS dont nous disposons dans les systèmes HiKoB [ubl, 2014a] donne une consommation de courant moyenne d'environ 40 mA, soit environ le triple de ce que nécessite la radio Atmel à pleine puissance d'émission. Ce dernier argument mérite

néanmoins d'être pondéré par les constants efforts des constructeurs pour réduire la consommation de leurs produits, et de réels progrès peuvent être observés sur des générations de GPS plus récentes [ubl, 2014b].

La recherche portant sur la localisation dans les réseaux de capteurs s'est orientée depuis de nombreuses années vers des méthodes visant à s'affranchir d'un positionnement GPS au profit d'un positionnement relatif, en réservant le positionnement absolu, s'il est nécessaire, à des nœuds beaucoup moins contraints en énergie [Amundson and Koutsoukos, 2009, Pal, 2010, Čapkun et al., 2002]. La littérature sur la localisation des systèmes sans fils identifie globalement deux phases :

- une phase de coordination, qui consiste à préparer le réseau à la mesure, en propageant un ordre et une information de synchronisation à l'ensemble des nœuds, afin de réaliser la mesure pour une durée déterminée.
- une phase de mesure, qui dépend à la fois du système de mesure de distance ou de position employé, et des algorithmes d'estimation. Durant cette phase, les nœuds sont amenés à échanger un certain nombre de messages leur permettant d'estimer les distances avec leurs voisins et les éventuelles balises, et de s'accorder sur leur positionnement.

Certaines méthodes s'affranchissent des mesures de distance physique, et considèrent un système de *coordonnées réseau*, représentant les connectivités par unités de sauts radio. La littérature donne de nombreuses techniques possibles pour la mesure de distance, certaines d'entre elles nécessitant du matériel dédié uniquement à ce propos, induisant un coût supplémentaire en énergie ou sur le facteur de forme du nœud communicant. On peut citer notamment des méthodes par émission d'ultrasons ou de signaux infrarouges, mais aussi de mesure d'angle d'arrivée (AOA, pour *Angle of Arrival*) mettant en jeu des antennes directionnelles. Les approches classiques basées sur la durée de propagation de l'onde électromagnétique entre deux nœuds (TOA, pour *Time of Arrival*), ou la durée d'aller-retour d'un message radio (TDOA, pour *Time Difference of Arrival*), supposent des horloges extrêmement précises, une synchronisation très fine des nœuds, ou l'utilisation d'une radio supplémentaire, ce qui complique la tâche. L'apparition très récente sur le marché des premières radios UWB apporte néanmoins l'espoir d'un seul composant radio capable d'assurer à la fois les communications entre les nœuds et une mesure de distance basée sur le TDOA avec une précision de quelques centimètres. La recherche portant sur cette technologie est très active, et des déploiements pratiques commencent à être envisageables [Minutolo and Annoni, 2014].

Jusqu'alors, les mesures de distance majoritairement mises en œuvre dans les réseaux de capteurs exploitent la capacité des radios à mesurer la puissance reçue lors

des échanges de messages, ce qui limite le surcoût matériel et énergétique. En effet, la puissance d'une onde lors de sa propagation est liée à la distance par la formule de Friis, on sait que P_r est proportionnelle à $\frac{1}{d^2}$ en espace libre. L'environnement pouvant influencer considérablement sur l'affaiblissement, on utilise communément un modèle d'affaiblissement proportionnel à d^n , n étant un paramètre dépendant de l'environnement généralement déterminé expérimentalement.

Toutefois, nous avons pu remarquer lors des chapitres précédents la forte instabilité du RSSI autour du corps humain en situation de mobilité, et de nombreux travaux portant sur ce type de mesure de distance tendent à mettre en évidence de fortes imprécisions de cette métrique en conditions pratiques, y compris lors de mesures en situation statique.

Les mesures effectuées dans [Benkic et al., 2008] montrent un accroissement de la variance du RSSI avec la distance, lorsque la part supposée des multi-trajets et les évanouissements rapides devient plus importante. Dans [Adewumi et al., 2013], les auteurs établissent un modèle empirique à partir de données obtenues expérimentalement en intérieur et en extérieur, qui met en évidence une erreur de mesure croissant avec la distance, conduisant à des écarts de l'ordre de 3 m pour une distance réelle de 10 m, ce qui est considérable. Les auteurs de [Heurtefeux and Valois, 2012] font preuve de scepticisme quant à l'utilisation du RSSI pour la mesure de distance. Ils pointent notamment la dynamique des canaux, le défaut de symétrie et d'isotropie, et tendent à montrer que les performances d'estimation d'algorithmes distribués peuvent se dégrader même si l'on augmente le nombre de points de référence. Ces exemples montrent la limitation de cette métrique, qui bien que pratique s'avère peu précise, et le besoin de réaliser des estimations très moyennées pour pallier les défauts de stabilité.

Grâce aux mesures de distance, plus ou moins précises, les nœuds sont amenés à estimer leurs coordonnées spatiales, ce qui implique généralement des méthodes de positionnement par rapport à des nœuds dont la position est connue. Multilatération, maximum de vraisemblance ou système masse-ressort sont des méthodes communément utilisées [Zanca et al., 2008, Zhang et al., 2010]. En l'absence de points de référence, des algorithmes tels que [Čapkun et al., 2002, Priyantha et al., 2003] nécessitent des échanges de messages très importants afin de faire émerger un repère global du réseau de façon distribuée et éviter les erreurs de positionnement comme le repliement des graphes liées à l'entière relativité des mesures.

On peut alors aisément imaginer les problèmes posés par la localisation distribuée dans un environnement très dense et très mobile. S'il faut dans un premier temps que chaque nœud estime un positionnement relatif avec ses voisins, ce qui constitue une première série d'échanges possiblement conséquents, il faut ensuite extraire ces informations du réseau par une méthode de routage dédiée, l'ensemble du processus

devant satisfaire de fortes contraintes de latence.

5.4 Consensus distribué

La détection de topologie peut être vue comme un problème de clustering, permettant d'identifier des groupes densément connectés. Selon l'application visée, le clustering peut permettre d'identifier des centres d'intérêt dans des réseaux à très large échelle par des approches centralisées [Blondel et al., 2008, Newman, 2004], ou d'établir une structure hiérarchique des réseaux afin d'organiser le transport de l'information [Shayeb et al., 2011].

Une autre approche du problème de décision distribuée au sein d'un réseau autonome peut être envisagée par des méthodes de *propagation de rumeur*, conduisant à la construction d'un *consensus distribué*. Ce type d'algorithmes permet, à travers des échanges de messages entre les nœuds à propager et construire de proche en proche une information globale commune à l'ensemble du réseau. La littérature à ce sujet est abondante, on peut notamment citer [Xiao et al., 2005, Boyd et al., 2006, Aysal et al., 2009], portant sur une estimation itérative de la moyenne. Dans ce problème, chaque nœud $v \in V$ d'un graphe $G = (V, E)$ possède une valeur initiale $x_v(0)$ (qui peut être la mesure issue d'un capteur). On cherche alors à estimer la valeur \bar{x} , moyenne arithmétique de l'ensemble des valeurs initiales de $X(0) = [x_1(0), x_2(0), \dots, x_N(0)]$. À l'issue du processus de consensus, l'ensemble des nœuds doivent converger vers la même estimation, et les performances des algorithmes sont évaluées par le temps de convergence et l'erreur d'estimation. Une approche comme celle-ci peut être intéressante dans un problème de localisation distribuée, pour aboutir à l'estimation de la position ou de la vitesse moyenne d'un groupe de nœuds. Si [Xiao et al., 2005, Boyd et al., 2006] considèrent des échanges individuels aléatoires entre les nœuds, [Aysal et al., 2009] montre l'avantage d'utiliser l'aspect *broadcast* des transmissions radio pour réduire le nombre de messages nécessaires à la convergence. Les travaux de [Kar and Moura, 2009] et [Maréchal et al., 2010] considèrent l'impact de différents phénomènes sur la convergence, comme l'asymétrie des liens, les échecs de transmission ou le bruit de mesure, qui sont d'importants problèmes des applications pratiques. Une approche du consensus pour les réseaux mobiles et les signaux dynamiques est donnée par [Spanos et al., 2005], où peuvent être prises notamment en considération des phases de séparation/fusion du réseau. L'introduction d'un facteur incluant la connectivité des nœuds permet au processus d'adapter la moyenne et de converger dynamiquement vers la valeur partagée par les composantes connexes issues du changement de topologie. Plus récemment, les travaux de [Sarwate and Dimakis, 2012] montrent quant à eux que certains comportements en termes de mobilité peuvent accélérer considérablement la convergence des algorithmes.

Outre l'estimation de la moyenne, [Cortes, 2008] s'intéresse à d'autres fonctions usuelles pouvant être utiles dans les applications de consensus, comme le *min* et le *max*. La convergence de ces opérations en temps fini est prouvée, sans plus de détail sur la vitesse de convergence ni la réalisation d'algorithmes pratiques. En revanche, les travaux de [Iutzeler et al., 2012] fournissent une analyse complète de deux algorithmes simples de max-consensus asynchrones, l'un basé sur des échanges aléatoires pair à pair, l'autre sur des émissions broadcast. Deux bornes théoriques valides sont fournies, l'une sur l'espérance du temps de convergence, l'autre sur le temps de convergence maximal.

Ces derniers travaux inspirent l'approche que nous présentons dans les chapitres suivants pour la constitution de groupes en situation de mobilité. Celle-ci peut en effet être vue comme une extension de l'algorithme de max-consensus par émissions broadcast tel que décrit par [Iutzeler et al., 2012]. Les travaux de [Terelius et al., 2012] considèrent dans une certaine mesure une extension de ce max-consensus au partage d'un vecteur de données, sans pour autant considérer la généralisation des bornes de convergence, et avec des objectifs applicatifs très différents. Nous abordons quant à nous l'aspect théorique de la convergence, et proposons un certain nombre d'adaptations, incluant notamment un critère de distance et une adaptation au contexte de mobilité.

5.5 Applications sportives

Guidés par le contexte applicatif qui constitue une finalité pour la validation des algorithmes et protocoles présentés dans l'ensemble de cette seconde partie, nous présentons dans un premier temps quelques exemples d'applications issues de travaux de recherche visant à capter un ensemble d'informations grâce à des systèmes sans fils équipant des vélos et/ou des cyclistes. Nous nous intéressons ensuite à des exemples d'expérimentations visant à caractériser les communications lors d'événements sportifs à grande échelle.

5.5.1 Cas du cyclisme

Une vue d'ensemble portant sur les capteurs pouvant être mis en place pour les activités cyclistes (coaching personnel, loisirs) est donnée par [Gharghan et al., 2014]. Cette étude, orientée vers l'efficacité énergétique, dresse un inventaire exhaustif des mesures pouvant être réalisées, ainsi qu'une comparaison de trois technologies radio potentielles (Zigbee, Bluetooth et ANT). Les auteurs mettent en avant le gain potentiel en énergie pouvant être apporté par la technologie ANT (standard propriétaire) [ant, 2014] pour les applications de coaching sportif.

Une référence importante du cyclisme connecté est le système expérimental BikeNet présenté dans [Eisenman et al., 2010], qui vise à équiper le cycliste et son vélo de tout un ensemble de systèmes d'instrumentation, captant aussi bien des données sur l'environnement que sur le comportement du sportif. Ayant pour but l'aspect social et participatif, BikeNet supporte l'intégration de nombreux capteurs sur le vélo (inertiels, CO₂, GPS, microphone ...) communicant suivant la norme 802.15.4 (via des plateformes Tmote Invent) et formant un BAN particulier. Le système supporte l'aspect *online* grâce à l'externalisation des données par un téléphone mobile, et DTN, dans le cas de points d'accès fixes le long du parcours. Des interconnexions opportunistes inter-BAN peuvent également être prises en charge, ainsi un BAN équipé d'un point d'accès mobile (téléphone) peut retransmettre les données d'autres BAN non équipés.

Le système Bikestatic [Reddy et al., 2010] présente lui aussi un aspect social visant à partager des informations sur la qualité des routes empruntées (trafic, état de la route, vitesse), et calculer des itinéraires en fonction de ces données dans le but d'améliorer la qualité de l'expérience. Pour les applications de loisirs, de tourisme, [Shin et al., 2013] propose un suivi de cyclistes sans GPS grâce à des balises fixes le long d'un parcours, communicant via le protocole Zigbee. Les positions ainsi que des données environnementales sont récupérées, la notion de sécurité des personnes et des équipements est également abordée. Pour le tourisme de groupe, les auteurs de [Yu et al., 2009] proposent le suivi de position et de rythme cardiaque, pour assurer la sécurité des personnes. Le groupe cycliste est vu comme un MANET, les différents nœuds étant capables de communiquer entre eux grâce à des protocoles multi-sauts. Un leader est équipé d'un système 3G. Il peut recevoir des alertes venant d'un nœud du groupe, et communiquer avec un serveur distant pouvant transmettre une mise à jour de l'itinéraire, par exemple. Un tel système est destiné à de petits groupes.

Les travaux de [Chohan and Fiorese, 2008] fournissent quant à eux une analyse empirique des canaux entre des vélos interconnectés par des radios 802.15.4 (système Crossbow, radio CC2420), via l'étude du RSSI et du indicateur de qualité de lien, en anglais *Link Quality Indicator* (LQI) fournis par les radios, dans diverses situations. Une estimation de l'évolution de ces métriques en fonction de la distance est fournie, avec et sans la présence du cycliste, mais sans mobilité. L'instabilité des mesures est vérifiée en présence du corps humain, mais peu de conclusions sont tirées quant à l'élaboration d'une métrique fiable permettant d'estimer les distances. Des distributions similaires du RSSI sont observées pour divers profils de personnes. En situation de mobilité, en conservant autant que possible une distance fixe entre les nœuds, l'étude ne semble pas montrer d'influence de la vitesse sur le RSSI.

Dans une optique plus orientée vers le sport professionnel, les auteurs de [Marin-Perianu et al., 2013], mettent en place un BAN réalisant une analyse précise du mouvement de la jambe avec des données inertielles acquises à haute fréquence (>100Hz) grâce à une couche MAC dédiée. Les mesures conjointes des angles entre cuisse mollet

et pied durant le mouvement, très importantes d'un point de vue biomécanique, sont calculées, et leur précision est validée par vidéo. [Le et al., 2007] propose une utilisation des systèmes sans fils afin d'adapter les programmes d'entraînement d'un groupe de cyclistes pour que chacun puisse atteindre des objectifs prédéterminés, basés sur le rythme cardiaque, évitant ainsi un surentraînement. Il est alors possible de suivre et commander à distance des changements de position à l'intérieur du groupe, d'adapter la vitesse globale du groupe, ou d'isoler certains coureurs. Si un suivi personnalisé et optimisé devient possible à l'entraînement, on imagine rapidement l'intérêt de tels apports en compétition, pour la stratégie d'équipe. Les travaux de [Kuhn et al., 2008] proposent également un système de suivi de rythme cardiaque mettant en œuvre des communications autour d'une piste équipée de balises régulièrement réparties assurant un acheminement multi-sauts vers le serveur de destination (coach).

De façon générale, si d'importants efforts ont été réalisés sur des plate-formes de coaching individuel ou de loisir, on peut voir que l'aspect multi-BAN, au sens des caractéristiques de propagation et de l'évolution des connectivités dans un réseau cycliste tel qu'il nous intéresse reste à étudier. Néanmoins, quelques études intéressantes de réseaux sportifs denses et mobiles sont développés ci-après.

5.5.2 Connectivité dans les réseaux multi-BAN sportifs

Le passage d'études théoriques ou de simulations aux déploiements pratiques est une tâche particulière. Comme nous avons pu le voir lors de la preuve de concept réalisée lors du Marathon de Paris, l'aspect pratique et les contraintes du direct nécessitent de mettre en place des mécanismes permettant d'assurer le succès de l'expérimentation, et certains problèmes non prévus peuvent apparaître. Les déploiements expérimentaux lors d'événements sportifs impliquant un grand nombre de participants doivent également faire l'objet d'autorisations spéciales, et peuvent mobiliser de nombreuses personnes et une logistique conséquente. Néanmoins, lorsque ceux-ci sont rendus possibles, ils ouvrent l'opportunité de collecter d'importants volumes de données "de terrain", permettant ensuite la création de modèles réalistes et une réutilisation ultérieure des traces pour les simulations.

Les travaux suivants nous intéressent, car les scénarios applicatifs s'approchent de celui que nous souhaitons mettre en œuvre. S'ils ne concernent pas directement le cyclisme, ils s'intéressent aux inter-connexions ayant lieu dans des groupes humains denses et de grande taille, évoluant dans la même direction sur un espace borné (une route). L'étude présentée dans [Pfisterer et al., 2006], par exemple, pose le problème du suivi d'un événement tel qu'un marathon à large échelle, comme de nombreuses villes en organisent. L'objectif est ici d'optimiser la répartition de stations de base le long du parcours tout en assurant la connectivité des participants par des mécanismes de transport multi-sauts. Les auteurs basent leur étude de connectivité sur un ensemble

de données d'environ 17000 participants lors du Marathon du Hambourg 2005. Les données recueillies sont les temps de passage de chaque participant par des "check-points" situés tous les 10 km ainsi qu'à l'arrivée, une interpolation étant réalisée afin d'estimer la position de chacun à tout instant. A partir de ces données, les auteurs estiment l'évolution du degré de connectivité, en considérant deux nœuds voisins si la distance les séparant est inférieure à 50 m, ce qui conduit naturellement à la formation de clusters. L'étalement croissant du groupe complet est également souligné.

Pour faire suite à ce travail, une étude expérimentale en situation est donnée dans [Lipphardt et al., 2007], consistant cette fois à analyser les connectivités entre une soixantaine de coureurs équipés, sur le même type d'événement. Les auteurs peuvent alors étudier de façon plus réaliste le comportement réel des connexions. La durée des contacts est enregistrée sur les nœuds, émettant des paquets indexés à une fréquence de 4 Hz. Un lien est considéré mort lorsque 50 paquets n'ont pas été reçus. De fortes pertes de paquets sont observées, dont la principale cause possible est le masquage lié aux corps en mouvement. La baisse de la connectivité au cours du temps est à nouveau mise en évidence, et l'intérêt de communications multi-sauts confirmé par l'analyse. La conception de protocoles dédiés n'est en revanche pas traitée dans ces travaux.

Une analyse très détaillée d'un réseau sportif mobile à grande échelle est apportée par [Tournoux et al., 2009, Tournoux et al., 2011]. Les auteurs décrivent un important déploiement visant à analyser les caractéristiques de connectivité d'un réseau formé par un ensemble de participants à une randonnée de roller à Paris. Le peloton formé par l'ensemble des participants est encadré par un ensemble de 62 personnes équipées de systèmes Intel iMotes, formant un réseau de balises Bluetooth, dont la portée est d'environ 10 m. Les participants étant enjoins à activer le système Bluetooth de leur téléphone, environ un millier de contacts sont recueillis. La découverte de voisinage est effectuée durant 5 s toutes les 15 s, ce qui donne une résolution temporelle relativement faible liée à la technologie. Néanmoins, le comportement global de la connectivité sur l'événement est mis en évidence, en particulier la caractérisation du phénomène d'accordéon lié à l'inertie du groupe. De plus, le comportement d'un tel réseau le rapproche d'un DTN, et les auteurs étudient l'impact du profil de mobilité sur un routage de type Spray-and-Wait [Spyropoulos et al., 2005], pour en venir à la proposition d'une méthode de routage basée sur ce même principe, adaptant le nombre de copies disséminées à la densité du réseau.

5.6 Nouveau contexte applicatif

Comme nous l'avons expliqué dans l'introduction, le nouvel objectif applicatif, faisant suite à l'approche individuelle développée dans la première partie, est à présent la cou-

verture d'un événement dans sa globalité. Nous considérerons maintenant des groupes mobiles de sportifs évoluant dans la même direction, tels qu'un peloton cycliste en compétition. Les intérêts de l'intégration de technologies sans fils répondant aux contraintes du direct pour des compétitions telles que le Tour de France sont multiples. Tout d'abord, si l'on considère la localisation en temps réel de l'ensemble des coureurs, ou des groupes de coureurs, la connaissance de l'évolution de l'événement est instantanée (composition des échappées, poursuites, bordures, etc.), ce qui jusqu'à présent ne peut être vérifié que visuellement, introduisant donc un délai non négligeable et de potentielles erreurs.

De plus, si l'on peut à terme localiser chaque coureur individuellement au sein du peloton, ces informations sont d'un grand intérêt, à la fois pour le spectateur, mais également pour les organisateurs et les équipes, dont la stratégie peut être améliorée dynamiquement. Enfin, au-delà de la localisation, on peut imaginer par le futur intégrer aux coureurs un réseau BAN individuel complet tel que le proposent certaines références données dans la section 5.5.1, permettant le suivi de données physiologiques ou bio-mécaniques. Ce dernier aspect soulève néanmoins le problème de la confidentialité des données et de la sécurité des transmissions, la diffusion d'informations comme le rythme cardiaque pouvant être adressée uniquement à un groupe restreint de destinataires.

Nous présentons en figure 5.1 la plate-forme mise en œuvre pour le suivi d'événements cyclistes. Le matériel HiKoB utilisé (capteurs FOX, routeurs LION) est le même que décrit dans la section 2.4.1 de la première partie, ainsi que la liaison série Euromedia permettant la centralisation des données vers la régie. Par rapport à la collecte individuelle, nous considérons uniquement dans cette nouvelle approche les communications entre les différents coureurs cyclistes, chacun étant équipé d'un seul nœud FOX. L'ensemble du réseau cycliste forme un réseau maillé, et la collecte est réalisée par les puits situés sur les motos, cette fois au nombre maximal de 3. Nous simplifierons l'approche en considérant, lors de la constitution de groupes différents, que chaque groupe est rattaché à au moins un puits. L'architecture pour cette partie est illustrée par la figure 5.1. Dans un premier temps nous validerons nos algorithmes de détection sur un groupe restreint (jusqu'à 20 coureurs en conditions expérimentales, puis de compétition réelle), avant de passer au déploiement complet, avec l'équipement de l'ensemble du peloton (jusqu'à 200 coureurs).

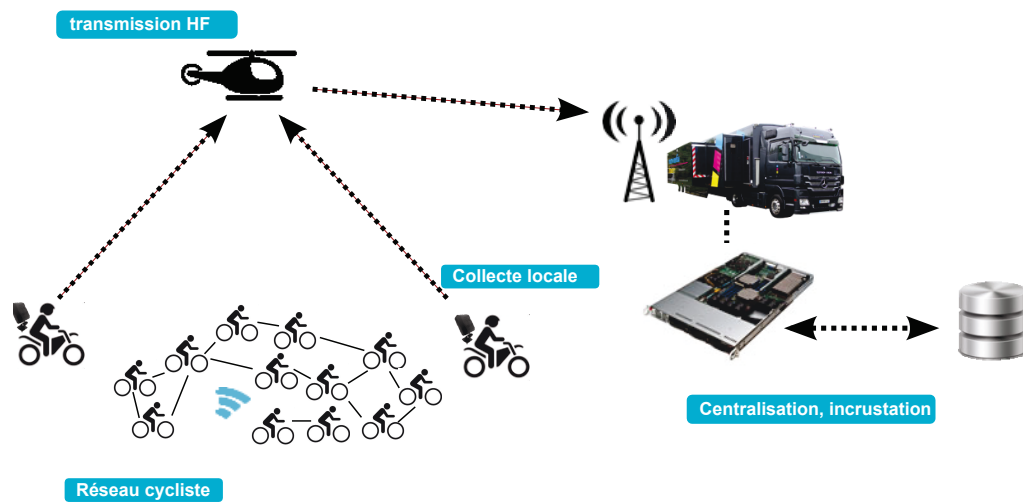


Figure 5.1 – Architecture générale mise en œuvre lors des expérimentations déployées pour le suivi de groupes cyclistes (réseau maillé). Dans un premier cas, une vingtaine de coureurs seront équipés, avant de passer au peloton complet.

6 Algorithmes de détection de groupes

Sommaire

6.1	Introduction	96
6.2	Détection de groupes statiques	97
6.2.1	Présentation de l'algorithme	97
6.2.2	Analyse de la convergence	98
6.2.3	Liens non fiables	101
6.3	Extensions de l'algorithme	101
6.3.1	Prise en compte de la proximité	102
6.3.2	Adaptation à des réseaux mobiles	103
6.4	Dispositif expérimental et calibration	105
6.4.1	Dispositif expérimental	105
6.4.2	Estimation de la proximité par RSSI	106
6.4.3	Calibration et protocole de communication	110
6.4.4	Déroulement de l'expérience et résultats	111
6.5	Conclusion	115

6.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce chapitre découlent de nos nouveaux objectifs applicatifs, à savoir la captation en direct de scénarios de mobilité au sein d'un réseau cycliste (échappée, poursuite ...). Nous cherchons alors à élaborer des méthodes permettant de détecter la topologie d'un ensemble d'agents communicants se déplaçant globalement dans la même direction, de manière complètement distribuée. Si le réseau ainsi constitué est assimilable à un graphe dynamique, nous souhaitons détecter, sous l'appellation de *groupes*, l'ensemble des composantes connexes de ce graphe et leur évolution au cours du temps. Si ce problème se rapproche d'un problème de clustering, le clustering vise davantage à organiser la topologie dans le but d'optimiser le schéma de communication du réseau.

Nous choisissons dans ce chapitre d'adopter le formalisme du consensus distribué, dans lequel les nœuds s'accordent ensemble et de manière distribuée sur leur appartenance à un même groupe, quelle que soit son étendue, en termes de sauts radio. Par cette méthode, chaque nœud est amené à découvrir son voisinage direct, mais également ses voisins atteignables par multi-sauts. L'approche que nous développons ici est distribuée et coopérative, chaque nœuds agissant comme un relais d'information, ce qui, de proche en proche, propage et construit l'information globale émanant du groupe. Si l'on rapproche ce principe au scénario applicatif visé, il nous permet de connaître l'ensemble des coureurs cyclistes composant les différents groupes évoluant au cours du temps. L'approche peut néanmoins être étendue à tout type de réseau mobile.

Partant des algorithmes de max-consensus statiques développés par [Iutzeler et al., 2012], nous dérivons des bornes théoriques valides sur les performances de convergence de la détection de groupes. Nous apportons ensuite deux extensions majeures à cet algorithme, permettant d'inclure un critère de proximité entre les nœuds, restreignant la notion de groupe à des nœuds géographiquement proches. La seconde extension permet, avec la même optique de max-consensus, d'adapter la détection de groupes à des réseaux mobiles, en introduisant une mise à jour périodique du consensus.

La validation de nos algorithmes est réalisée de façon expérimentale, avec la mise en place d'un plate-forme de capteurs permettant le suivi d'un groupe cycliste à petite échelle, pouvant comporter jusqu'à 20 coureurs. Le test réalisé en conditions réelles avec 10 coureurs permet de valider notre approche, et ouvre la voie à la mise en place de la plate-forme sur un peloton complet, pour des courses de niveau international.

6.2 Détection de groupes statiques

L'algorithme de détection de groupes que nous décrivons dans ce chapitre peut être exprimé comme l'extension d'un algorithme de max-consensus tel que décrit dans [Iutzeler et al., 2012] à un vecteur de données. Dans cette section nous présentons la version statique de l'algorithme développé dans ce chapitre, ce qui veut dire que la connectivité entre les nœuds reste la même au cours du temps. Cette hypothèse nous permet de généraliser les bornes théoriques de l'algorithme de max-consensus simple données par [Iutzeler et al., 2012], pour un consensus étendu à un vecteur de données.

6.2.1 Présentation de l'algorithme

L'ensemble formé par les nœuds statiques et leurs connectivités peut être modélisé par un graphe non-orienté $G = (V, E)$, V représentant l'ensemble des nœuds ($V = \{1, 2, \dots, N\}$) et E l'ensemble des connexions entre les nœuds. Si $l(v, w)$ est le nombre minimal d'arêtes nécessaire à la connexion de deux nœuds, on définit le diamètre du graphe $\Delta_G = \max\{l(v, w) : (v, w) \in N^2\}$. Les liens sont supposés sans erreur et constants dans le temps, sans possibilité de collision : si l'arête entre deux nœuds existe, ceux-ci sont systématiquement capables de communiquer, et la communication est possible dans les deux sens.

Le réseau est considéré comme asynchrone, au sens où il n'existe pas d'horloge commune à l'ensemble des nœuds ; on considère que les horloges locales assurent des émissions suivant un processus aléatoire. Dans ce schéma, il est communément considéré que les horloges de chaque nœud suivent des processus de Poisson indépendants d'intensité λ . Ce modèle revient à considérer une horloge globale comme un processus de Poisson de paramètre $N\lambda$ pour lequel un nœud est choisi pour émettre suivant une loi uniforme à chaque coup d'horloge globale. En d'autres termes, à chaque instant t (nouveau tick d'horloge globale), un seul nœud v est désigné pour émettre avec une probabilité $p_v = \frac{1}{N}$. Ces hypothèses de simplification des réseaux asynchrones sont communément admises dans la littérature [Iutzeler et al., 2012, Boyd et al., 2006, Aysal et al., 2009].

L'algorithme de consensus de groupe statique, en anglais *Static Group Consensus* (SGC) a pour objectif que chaque nœud obtienne la connaissance de l'ensemble de sa composante connexe, c'est-à-dire l'ensemble des nœuds qui lui sont connectés via un chemin à plusieurs sauts. Chaque nœud v possède un vecteur booléen interne B^v de taille N fixe, initialisé à 0, à l'exception de $B_v^v = 1$. À l'issue de l'exécution de l'algorithme, $B_i^v = 1$ si les nœuds i et v se trouvent dans la même composante connexe. L'algorithme est de type *broadcast*, chaque paquet émis peut être reçu par l'ensemble des nœuds à portée. Le processus SGC est présenté dans l'algorithme 6.1,

\max représente ici l'opération *maximum* réalisée sur chaque composante du vecteur. Dans le cas booléen, cette opération est assimilée à un "ou" logique. La condition finale n'est pas considérée ici, nous donnons ci-après une analyse détaillée des performances de l'algorithme, et abordons ce point plus avant dans ce chapitre.

Algorithm 6.1 CONSENSUS DE GROUPE STATIQUE

(Exécuté sur chaque nœud v)

Initialiser $B^v = \mathbf{0}$

Initialiser $B_v^v = 1$

Répéter

$T_{max} = \text{random}(0 - T)$

Tant que T_{max} n'a pas expiré

recevoir (B^j) du nœud j

$B^v = \max(B^v, B^j)$

Fin tant que

émettre (B^v)

Jusqu'à condition finale

Cet algorithme est une extension directe de l'algorithme max-consensus broadcast aléatoire, en anglais *Random Broadcast Max* (RBM) décrit dans [Iutzeler et al., 2012]. Dans notre cas, chaque nœud récupère en quelque sorte la valeur maximale contenue par tous les autres. Lors de la réception du vecteur, l'opération de maximum est réalisée sur chaque composante. Cette extension entraîne une augmentation du temps de convergence par rapport au max-consensus scalaire, mais il est possible d'étendre l'analyse de performance donnée par [Iutzeler et al., 2012].

6.2.2 Analyse de la convergence

Dans un graphe statique, chaque composante connexe verra l'algorithme SGC converger de façon indépendante, nous proposons dès lors d'étudier la convergence sur un graphe complètement connecté, soit une seule composante connexe de taille N . Dans ce cas, la convergence est atteinte lorsque l'ensemble des vecteurs B^v contenus par chaque nœud atteignent $B^v = \mathbf{1}$. Le temps de convergence τ peut alors être défini comme étant équivalent au nombre de messages échangés (ou nombre de coups d'horloge globale équivalente) permettant d'atteindre l'uniformisation des valeurs de B^v :

$$\tau = \min_n \{n \in \mathbb{N} | \forall v \in V, B^v = \mathbf{1}\}$$

Du fait de l'opération \max effectuée à chaque instant, dès lors qu'un élément de B^v passe à 1, son état n'est plus modifié, il est assez évident que la convergence a lieu

en temps fini, soit $\tau < \infty$. Les théorèmes suivants fournissent en revanche une borne supérieure de l'espérance mathématique du temps de convergence $\mathbb{E}[\tau]$, ainsi qu'une borne supérieure de τ . La démarche aboutissant à l'établissement de ces bornes suit l'approche donnée par [Iutzeler et al., 2012].

Theorem 6.2.1 *Pour l'algorithme de Consensus de Groupe Statique l'espérance mathématique du temps de convergence τ est telle que :*

$$\mathbb{E}[\tau] < N\Delta_G(1 + \ln(N))$$

Theorem 6.2.2 *Pour l'algorithme de Consensus de Groupe Statique le temps de convergence τ est borné, avec une probabilité $1 - \epsilon$ par :*

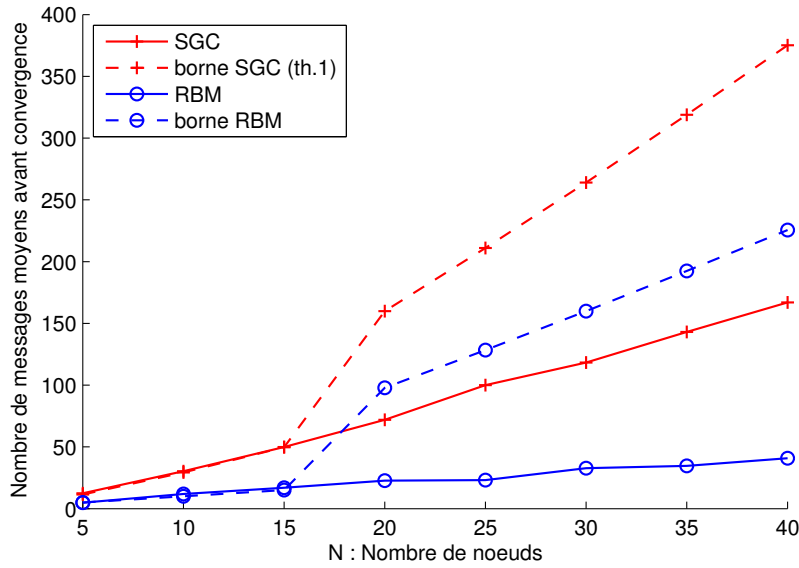
$$\tau < N\Delta_G \left(\ln(N) + \ln \left(\frac{\Delta_G}{\epsilon} \right) \right)$$

Les preuves de ces deux théorèmes sont données respectivement par les annexes A.1 et A.2. Nous proposons maintenant de confronter ces bornes à celles données pour le max-consensus simple, et d'étudier la convergence de notre algorithme en simulation.

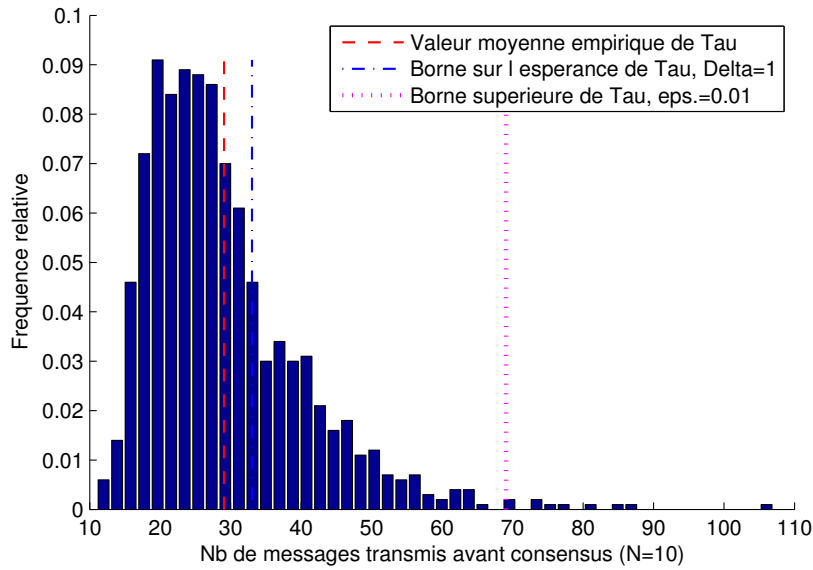
L'environnement de simulation est similaire à celui donné par [Iutzeler et al., 2012]. Les algorithmes sont exécutés sur des graphes géométriques aléatoires à N nœuds, placés aléatoirement et uniformément à l'intérieur d'un carré unitaire. La connexion entre deux nœuds est considérée comme établie si la distance les séparant est inférieure à un rayon r . Nous choisissons $r = \sqrt{\frac{8 \log(N)}{N}}$, cette valeur assurant la connectivité du graphe avec une forte probabilité [Penrose, 2003].

La figure 6.1a montre une comparaison entre les performances des algorithmes RBM et SGC. Nous présentons les valeurs moyennes empiriques obtenues par simulation pour un nombre croissant de nœuds, ainsi que les bornes sur l'espérance de τ pour les deux algorithmes. La convergence de l'algorithme SGC est plus lente que celle de RBM, du fait d'un plus grand nombre de communications nécessaires pour que l'ensemble des N nœuds émettent et partagent leurs données. La convergence de SGC semble suivre en réalité celle de RBM, dès lors que $\Delta_G \geq 2$ (en simulation, du fait des graphes aléatoires, $\Delta_G = 2$ pour $N \geq 15$). Nous constatons également que l'écart entre les bornes théoriques et les valeurs obtenues empiriquement est relativement élevé; néanmoins il semble du même ordre de grandeur pour les deux algorithmes.

La densité de probabilité obtenue par simulation du nombre de messages permettant d'atteindre le consensus pour l'algorithme SGC est donnée par la figure 6.1b, avec $N = 10$, $\Delta_G = 1$ et $\epsilon = 0.01$, ce qui correspond le mieux aux conditions expérimentales décrites plus avant, dans la section 6.4.4. Bien qu'une très forte probabilité de convergence soit donnée pour un nombre de communications faibles, la nature aléatoire



(a) Temps de convergence moyen simulé (exprimé en nombre de messages échangés), incluant les bornes supérieures de l'espérance, pour les algorithmes RBM [Iutzeler et al., 2012] et SGC. Le décrochement observé correspond à une augmentation du diamètre du graphe pour $N > 15$



(b) Distribution empirique du temps de convergence de l'algorithme SGC, pour 1000 itérations avec $N = 10$ nœuds, mis en relation avec les bornes données par les théorèmes 6.2.1 et 6.2.2, avec $\Delta_G = 1$ et $\epsilon = 0.01$

Figure 6.1 – Analyse des performances de l'algorithme SGC, mis en relation avec l'algorithme de max-consensus RBM [Iutzeler et al., 2012], et les bornes données par les théorèmes 6.2.1 et 6.2.2.

uniforme du processus d'élection de l'émetteur à chaque tirage conduit à l'apparition d'une probabilité non nulle d'un temps de convergence au-delà de la borne théorique,

qui reste néanmoins valide.

Si les bornes sont validées ici par des simulations simples répondant au cadre théorique donné dans l'analyse, elles seront confrontées, ainsi que les valeurs obtenues en simulation, avec les résultats pratiques résultant de la validation expérimentale décrite en section 6.4.4.

6.2.3 Liens non fiables

Le cadre théorique développé ici ne tient pas compte de canaux erronés. Or de nombreux facteurs, dépendant notamment de l'environnement et des protocoles de communication implémentés, peuvent avoir un impact plus ou moins élevé sur la qualité des transmissions, certains liens pouvant être momentanément absents, ou conduisant à des paquets reçus erronés. Dans le premier cas, des déconnexions momentanées n'auront pas d'influence sur la valeur finale du consensus, il est en revanche évident qu'elles auront un impact négatif sur le temps de convergence. Le choix d'un algorithme de type broadcast permet néanmoins de limiter cet effet par la diversité spatiale inhérente à ce type de communication, chaque nœud pouvant être vu comme un relais d'information.

En revanche, l'algorithme que nous présentons n'est pas robuste à l'apparition de paquets erronés, ainsi une fausse information de présence d'un nœud peut être propagée à l'ensemble du réseau. Si des travaux comme [Kar and Moura, 2009] visent quant à eux à éviter la prise en compte d'informations erronées, il est en pratique également possible d'ajouter des méthodes de détection d'erreurs, réduisant drastiquement la probabilité de faux positifs. Par cette méthode, un paquet détecté comme erroné est systématiquement rejeté, car dans l'optique d'un algorithme de détection de présence, l'apparition d'un faux positif est beaucoup plus critique qu'une déconnexion momentanée, l'information portée par le paquet non reçu pouvant être prise en compte lors d'une transmission ultérieure.

6.3 Extensions de l'algorithme

Si le principe de l'algorithme de détection de groupe SGC est validé, il convient à présent dans cette section de présenter deux extensions intéressantes pour un ensemble d'applications pratiques. La première consiste en une prise en compte d'un critère de distance, permettant d'étendre la notion de groupe à des séparations artificielles des graphes, selon une granularité souhaitée. La seconde est un mécanisme de synchronisation distribuée, permettant une réévaluation périodique des groupes, avec pour objectif de détecter les variations de la topologie des graphes dynamiques.

6.3.1 Prise en compte de la proximité

L'algorithme SGC réalise une détection binaire des composantes connexes du graphe, via le partage et l'agrégation de valeurs binaires de voisinage. Il peut être néanmoins intéressant, selon le scénario applicatif, d'étendre les informations partagées à des valeurs non binaires, liées au contexte d'application, comme les valeurs mesurées par les capteurs (température, humidité, position...). Ceci peut permettre en effet de mettre en place une détection de groupes selon un critère dépendant directement de l'application visée.

Dans le cas de la plate-forme expérimentale décrite dans la section 6.4.4, nous proposons de contraindre la notion de groupe à un critère de proximité entre les nœuds, ce qui constitue l'approche décrite dans cette section. Si l'on considère qu'un nœud ne doit pas prendre en compte l'information apportée par un voisin, joignable mais trop éloigné, ou dont le lien est peu fiable, la notion de groupe se réduit alors à un ensemble de voisins "proches" (que nous appellerons *partenaires*, ou *mates*, en anglais), par opposition au voisinage étendu, constitué de l'ensemble des nœuds avec lesquelles la connexion est possible. Ainsi des voisins au sens des communications peuvent ne pas faire partie du même groupe tel que défini par l'application.

Dans cette optique, un nœud est amené à agréger et partager uniquement les données reçues de ses partenaires, ce qui conduit à la construction de groupes de partenaires à plusieurs sauts, et une séparation du graphe en plusieurs sous-ensembles basée sur le critère de proximité. Il est également possible de partager la connaissance des nœuds de deux groupes entre lesquels une connexion existe, mais dont la proximité est inférieure au critère défini.

L'algorithme 6.2 présente le consensus sur les groupes de partenaires, en anglais *Group Mate Consensus* (GMC). Nous donnons dans la section 6.4.2 un exemple concret d'implémentation du critère de proximité entre les nœuds, basé sur une estimation de distance utilisant le RSSI. Les vecteurs B^v sont à présent constitués de valeurs entières $B_i^v \in [0; M]$, $M \in \mathbb{N}$, qui représentent la proximité entre les nœuds selon le critère choisi. On définit une nouvelle matrice d'adjacence $N \times N$ C : $c_{ij} = 1$ si i et j sont partenaires, 0 dans le cas contraire. L'ensemble des arêtes E_C associé à C modélise la partition du graphe et l'ensemble des diamètres $\Delta_{C1}, \Delta_{C2}, \dots, \Delta_{CZ}$, des Z groupes constitués.

Algorithm 6.2 GROUP MATE CONSENSUS

(Exécuté sur chaque nœud v)

Initialiser $B^v = \mathbf{0}$

Initialiser $B_v^v = M$

Répéter

```

 $T_{max} = random(0 - T)$ 
Tant que  $T_{max}$  n'a pas expiré
    recevoir ( $B^j$ ) du nœud  $j$ 
     $proxim = f(RSSI) // proxim \in [0; M]$ 
    Si ( $proxim > seuil$ ) //i.e.  $j$  et  $v$  sont partenaires
         $B^v = \max(B^v, B^j)$ 
    Sinon
         $B_j^v = \max(B_j^v, proxim)$ 
    Fin si
Fin tant que
    transmettre ( $B^v$ )
Jusqu'à condition finale

```

6.3.2 Adaptation à des réseaux mobiles

Dans le cas d'un réseau mobile, deux situations élémentaires peuvent typiquement se présenter : une composante connexe se sépare en deux groupes, ou à l'inverse, deux groupes se rejoignent pour n'en former qu'un seul, nous appellerons ces variations *séparation* et *fusion*. Le réseau mobile est dans ce cas modélisé par un graphe dynamique $G(t) = (V, E_C(t))$, dont la dynamicité globale est supposée d'un ordre de grandeur bien inférieur à l'échelle temporelle des communications radio.

Lorsque survient une fusion, un nœud s'approchant d'un groupe est naturellement intégré par le processus SGC, qui réalise une opération \max . Le vecteur qu'il partage est intégré aux données partagées par le groupe et à l'issue du processus ($t = \tau$) le vecteur partagé par l'ensemble contient le résultat de la fusion. A l'inverse, si un nœud disparaît d'un groupe (ou deux groupes se séparent, ce qui est équivalent), l'opération \max ne peut propager son absence. L'oubli d'un nœud de façon dynamique, avec un processus continu peut s'avérer complexe. Chaque nœud devrait en effet maintenir et propager davantage d'informations relatives à la durée des liens, avec un risque de réinjecter dans les informations partagées des liens qui n'ont plus cours. Dans un souci de simplicité, nous proposons plutôt de réaliser une mise à jour périodique de la connectivité des groupes, par une remise à zéro de tous les vecteurs B^v . Par cette méthode, lors de la disparition d'un (ou plusieurs) nœuds, celle-ci est prise en compte par l'absence de transmission émanant des absents à la période suivante.

Cette approche nécessite donc l'implémentation d'une méthode de synchronisation. Nous considérons une horloge globale du réseau K , que nous appellerons *époque*. Chaque nœud v possède en interne un indicateur local d'époque $k_v \in \mathbb{N}$. Ces horloges sont des horloges virtuelles représentant un "temps réseau", elles ne doivent pas être confondues avec les horloges physiques des capteurs. Toutes les horloges k_v sont initialisées à 0, et transmises avec les vecteurs B^v . La synchronisation du

réseau consiste alors à propager un indicateur d'époque incrémenté, suivant le même processus de max-consensus. La source propageant cette nouvelle époque peut être indifféremment un nœud ou une source externe (puits requérant une mise à jour). C'est ce dernier cas que nous traitons ici, qui est implémenté dans l'expérimentation pratique de ce chapitre.

Le puits déclenche une nouvelle époque par l'incrémentation de son horloge locale, qui est en réalité l'horloge globale que le réseau doit atteindre. La nouvelle époque K est alors propagée à l'ensemble des nœuds à portée sous forme d'une balise. Les nœuds recevant la balise, pour lesquels l'horloge interne $k_v < K$, remettent à zéro leur vecteur B^v et mettent à jour leur horloge locale ($k_v = K$). Au moment d'émettre, ceux-ci propagent à leur tour la nouvelle époque avec un vecteur B_v réinitialisé, ce qui permet aux nœuds trop éloignés pour recevoir la balise d'être informés par leurs voisins par multi-sauts.

Une période de transition peut néanmoins apparaître, durant laquelle certains nœuds continuent à transmettre l'époque $K - 1$. Leurs informations ne sont alors pas être prises en compte par les nœuds ayant déjà basculé vers l'époque K . De plus, par cette méthode, si deux groupes évoluent avec deux valeurs d'horloges différentes, dans le cas d'une fusion, l'ensemble des nœuds des deux groupes se synchronisent rapidement sur l'époque de plus haute valeur. L'algorithme de consensus sur les groupes de partenaires mobiles, en anglais *Mobile Group Mate Consensus* (MGMC) est décrit par l'algorithme 6.3, mettant en œuvre la synchronisation externe.

Algorithm 6.3 MOBILE GROUP MATE CONSENSUS

(Exécuté sur chaque nœud v)

Initialiser $B^v = \mathbf{0}$

Initialiser $B_v^v = M$

Répéter indéfiniment

$T_{max} = \text{random}(0 - T)$

Tant que T_{max} n'a pas expiré

recevoir le paquet P

Si $P = \{k_j, B^j\}$ du nœud j

$\text{proxim} = f(\text{RSSI})$ // calcul de proximité[0;M]

Si $k_j > k_v$ // nouvelle époque

$k_v = k_j$

réinitialiser B^v

Fin si

Si ($\text{proxim} > \text{Seuil}$) // i.e. j et v sont partenaires

$B^v = \max(B^v, B^j)$

Sinon

```


$$B_j^v = \max(B_j^v, \text{proxim})$$

Fin Si
Fin Si
Si  $P$  est une balise d'époque  $K$  // transmise par le puits
    Si  $K > k_v$  // nouvelle époque
         $k_v = K$ 
        réinitialiser  $B^v$ 
    Fin Si
Fin Si
Fin Tant que
transmettre  $(\{k_v, B^v\})$ 
Sans fin

```

6.4 Dispositif expérimental et calibration

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, l'objectif des expérimentations déployées est le suivi en direct de groupes cyclistes équipés de nœuds communications, la centralisation des informations étant assurée par des puits mobiles situés sur des motos à proximité de l'événement. On souhaite détecter l'évolution dynamique des groupes, donc les scénarios typiques de séparation et de fusion qui peuvent avoir lieu durant la course, en considérant deux groupes disjoints lorsque la distance les séparant dépasse 20 mètres. Ceci est un critère typique qui nous est fixé par les organisateurs, sur lequel nous nous basons pour l'estimation de distance. Nous présentons dans cette section le dispositif expérimental que nous avons mis en place pour la validation des algorithmes de détection de groupes, ainsi que la méthode empirique mise au point pour l'estimation de proximité et le protocole de communication retenu.

6.4.1 Dispositif expérimental

L'architecture spécifique à cette expérimentation est donnée ici par la figure 6.2. Nous avons réalisé, pour une première validation, une plate-forme pouvant prendre en compte jusqu'à 20 coureurs, et un groupe constitué de 10 coureurs réguliers s'est aimablement prêté à l'expérimentation, autour des locaux de la société Euromedia, à Bry-sur-Marne. Deux motos ont été mobilisées afin de suivre les groupes et remonter les informations, en liaison directe avec le camion régie.

La validation, en interne, de la plate-forme, consiste en une interface de visulaton sur une carte (indiquée sur la figure 6.2) développée par Antoine Fraboulet (HiKoB),

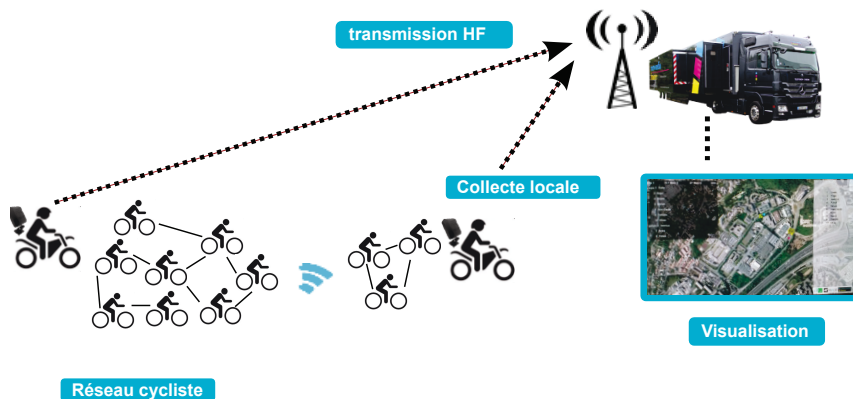


Figure 6.2 – Architecture de l'expérimentation cycliste à petite échelle.

des signaux issus du lien série récupérés directement sur un PC, indiquant la position et la constitution des groupes.

6.4.2 Estimation de la proximité par RSSI

Comme nous l'expliquons plus haut, pour ce scénario expérimental les nœuds doivent être capables d'estimer la distance qui les sépare de leurs voisins. Nous avons dressé dans le chapitre précédent une vue d'ensemble des méthodes utilisées pour l'estimation du positionnement ou de la mesure de distance entre les différents nœuds d'un réseau. Compte tenu du matériel dont nous disposons, et pour des raisons de consommation énergétique, nous proposons une approche basée sur le RSSI, mesure disponible lors de chaque réception d'un paquet radio.

Bien que cette mesure soit connue pour son instabilité, particulièrement en présence du corps humain en mouvement, nous proposons de construire une évaluation de distance empirique à partir d'un ensemble d'échantillons reçus pour chaque lien. Si [Chohan and Fiorese, 2008] étudie l'évolution du RSSI en fonction de la distance dans un scénario de cyclisme, les auteurs réalisent des mesures statiques, qui ne tiennent pas compte du mouvement du corps. Afin de mesurer l'évolution des canaux dans des situations d'éloignement dynamique, nous proposons de réutiliser la plateforme de mesure décrite dans le chapitre 4, effectuant périodiquement la mesure des canaux d'un maillage complet, grâce à des émissions séquencées. La figure 6.3a rappelle la plate-forme de mesure maillée, que nous avons modifiée. Les trois nœuds émettent durant leur temps de parole respectif, tandis que les deux autres écoutent et enregistrent la mesure d'ED reçue. Le nœud *Ctrl* permet d'activer manuellement l'écriture sur la carte SD afin de conserver facilement uniquement les données utiles.

Un second nœud marqueur, *Mark*, commandé lui aussi manuellement (par bouton poussoir) permet de conserver les instants auxquels les capteurs franchissent une distance particulière.

Pour bien comprendre la mesure effectuée, le scénario mis en œuvre est illustré par la figure 6.3b. Nous mettons en scène une séparation dynamique, proche des conditions réelles. Trois cyclistes sont chacun équipés d'un capteur FOX (*A*, *B* et *C*) et disposés en ligne droite. Le nœud *A* reste fixe à une distance $d = 0$, tandis que *B* et *C* s'éloignent progressivement, jusqu'à atteindre $d = 40$ m. Durant cette période le protocole de mesure est actif, et le second marqueur est déclenché chaque fois que le nœud *B* franchit 10m. L'expérience a été répétée 10 fois, ce qui donne environ 1000 échantillons lors de chaque passage.

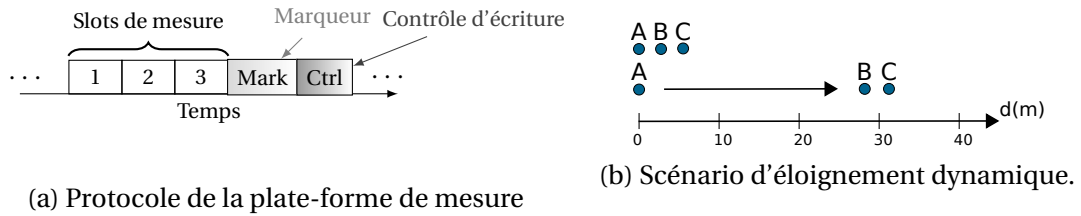


Figure 6.3 – Protocole mis en œuvre sur la plate-forme de mesure, et scénario d'éloignement dynamique. Les nœuds *B* et *C* s'éloignent progressivement de *A*, un marqueur est déclenché chaque fois que le nœud *B* franchit 10 mètres.

La figure 6.4 présente les résultats obtenus sur le lien $A \leftrightarrow B$ pour 3 réalisations dans les deux sens de propagation, ainsi que le processus d'élaboration du critère de distance dynamique que nous avons mis au point et développons ici. Nous pouvons noter une décroissance globale des canaux bruts (représentés en noir), mais comme attendu une instabilité très forte nécessitant traitement avant interprétation. Nous cherchons ici, compte tenu du contexte, que chaque nœud puisse réaliser une mesure de proximité en ligne avec ses voisins lors de la réception de chaque paquet. Il semble peu approprié d'adapter des méthodes telles qu'un modèle log-normal classique, nous nous orientons plutôt vers une estimation empirique visant à lisser à la fois les variations rapides et lentes des canaux, pour en extraire une décroissance plus lente encore, liée uniquement à l'éloignement. L'estimation doit également limiter le nombre d'échantillons nécessaires, afin de prendre en considération les ressources limitées des capteurs en RAM.

L'indicateur de proximité que nous proposons est la combinaison de deux moyennes opérées sur les derniers échantillons d'ED reçus, la première à court terme, que nous appellerons instantanée, la seconde à plus long terme. Considérons le lien l_{AB} de *A* vers *B* et le signal de mesure associé $s(t_n)$ reçu à l'instant t_n . Celui-ci est dans un premier temps passé en valeurs positives dans un souci de simplicité, soit $p(t_n) = s(t_n) - ED_{min}$, dans notre cas $ED_{min} = -91dBm$. La moyenne glissante in-

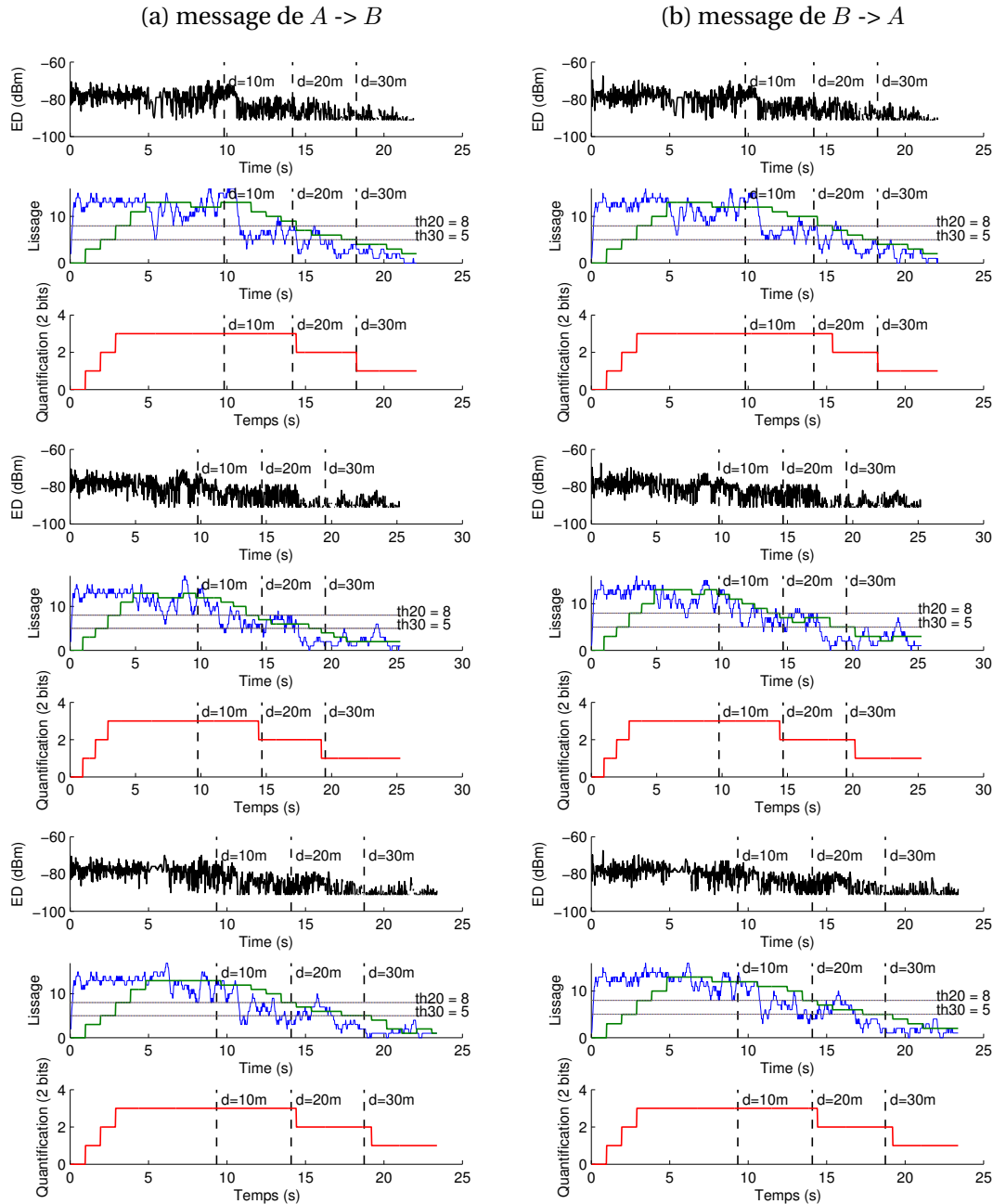


Figure 6.4 – Illustration du processus de lissage et de quantification de l'estimation de proximité entre les nœuds A et B lors d'un éloignement dynamique. Chaque figure présente la mesure d'ED brute (en noir), puis le processus de lissage, à court terme (en bleu), puis à long terme (en vert). Enfin nous présentons la quantification effectuée (en rouge) à partir des seuils notés th_{20} et th_{30} (pour respectivement 20 et 30 m). La représentation est donnée pour 3 réalisations du scénario dans les deux sens de propagation.

stantanée, de taille W_1 , lissant les variations à haute fréquence est définie ainsi : soit V_1 le vecteur contenant au maximum les W_1 dernières mesures reçus sur une durée Δ_{t1} :

$$V_1 : \begin{cases} v_i^1 = p(t_{n-i}), & \text{if } (t_n - t_{n-i}) \leq \Delta_{t1} \\ v_i^1 = 0, & \text{else} \end{cases}, 0 \leq i \leq W_1 - 1$$

La moyenne instantanée est alors: $s^1(t_n)$ is:

$$s^1(t_n) = \frac{1}{W_1} \sum_{i=0}^{W_1-1} v_i^1$$

La valeur de $s^1(t_n)$ est alors échantillonnée à une période Δ_{t2} et stockée dans un vecteur V_2 , de taille W_2 , tel que

$$V_2 = [s^1(k\Delta_{t2}), s^1((k-1)\Delta_{t2}), \dots, s^1((k-W_2+1)\Delta_{t2})]$$

$k\Delta_{t2}$ étant le dernier instant d'échantillonnage de s^1 . La moyenne à long terme $s^2(t_n)$ est alors une moyenne de V_2 :

$$s^2(t_n) = \frac{1}{W_2} \sum_{i=0}^{W_2-1} v_{2,i}$$

Cette seconde moyenne glissante tend à lisser les variations plus lentes liées au mouvement et à certaines variations de l'environnement. Afin de limiter la quantité d'informations échangées dans le réseau, l'indice de proximité est finalement quantifié sur 2 bits, selon deux seuils th_{20} et th_{30} , étant les valeurs de s^2 à $d = 20m$ et $d = 30m$, moyennées sur l'ensemble des 10 réalisations.

L'ensemble du processus est illustré sur la figure 6.4. Les paramètres obtenus empiriquement sont $W_1 = 10$, $W_2 = 5$, $\Delta_{t1} = \Delta_{t2} = 1s$ et $k = 5$. La précision de notre méthode, compte tenu du protocole de mesure, est difficile à exprimer, nous pouvons néanmoins constater qu'elle permet d'extraire un indice de proximité variant de façon monotone avec la distance, et de détecter des séparations entre deux nœuds autour de 20 m de façon relativement fiable. Nous vérifions également un comportement correct dans les deux sens de propagation. L'application de cette méthode au lien $A \leftrightarrow C$, non représentée ici, nous a permis de vérifier la décroissance plus rapide de ce lien, ce qui était un résultat attendu. Grâce à ce processus, chaque nœud conserve un nombre limité d'échantillons par lien (seulement $W_1 + W_2$ échantillons, soit un total de 15 dans notre cas, permettent l'évaluation), et les fonctions de moyennes glissantes sont aisément implémentables par l'utilisation de buffers circulaires.

6.4.3 Calibration et protocole de communication

Pour notre validation expérimentale, nous avons implémenté l'algorithme MGMC complet (algorithme 6.3), avec transmission périodique de balise par les routeurs HiKoB Lion situés sur les motos. Soit $d(v, j)$ l'estimation de proximité résultant de la quantification sur 2 bits, décrite dans la section précédente, calculée par le nœud v recevant un paquet du nœud j . La condition pour que v accepte j comme partenaire est une distance inférieure à 20 m. Compte tenu de la quantification, la valeur maximale partagée est $M = 3$, et $C_{vj} = 1$ si $d(v, j) \geq 3$. Afin de visualiser les inter-connexions entre les groupes, si $d(v, j) \leq 3$, nous réalisons une opération \max uniquement sur la composante B_j^v , soit $B_j^v = \max(B_j^v, d(v, j))$. Ceci ne modifie pas le résultat de la détection, mais apporte l'information d'une connectivité entre deux groupes disjoints, et sur quels liens cette connectivité réduite existe.

Nous ajoutons également dans les paquets d'informations, le vecteur $B^v(k_{v-1})$, qui correspond à l'information au vecteur du nœud v à la fin de l'époque précédente. Cette partie du paquet est destinée au puits, qui peut alors facilement connaître l'information de convergence à la période précédente de façon complètement opportuniste, sans interférer avec le réseau de capteurs. Il lui suffit alors d'écouter les paquets qui transitent sur le réseau, ce qui évite la mise en place de mécanismes de transmission plus complexes (RTS, CTS, ACK), et l'élection d'un transmetteur parmi les nœuds. Conçu pour $N = 20$ nœuds, avec une quantification sur 2 bits, chaque vecteur B^v est composé de $N \times 2 = 40$ bits, soit 5 octets.

Le protocole de communication, afin de permettre un échantillonnage significatif de l'ED, doit assurer la réception de 10 paquets par nœud par seconde, pour des voisins proches. Le protocole mis en œuvre est ici aléatoire, ce qui se justifie par la difficulté de mettre en place une organisation synchronisée des communications, du fait de la forte mobilité et des topologies variables. On fixe en pratique $T_{max} = 70ms$, car cette valeur assure un taux de réception d'environ 15 paquets par seconde par nœud en condition statique, donnant un temps empirique de convergence maximal de 200 ms. Nous implémentons un protocole de type CSMA/CA sans acquittement, T_{max} jouant le rôle du backoff aléatoire, dont la décrémentation est gelée dès lors que le canal est occupé.

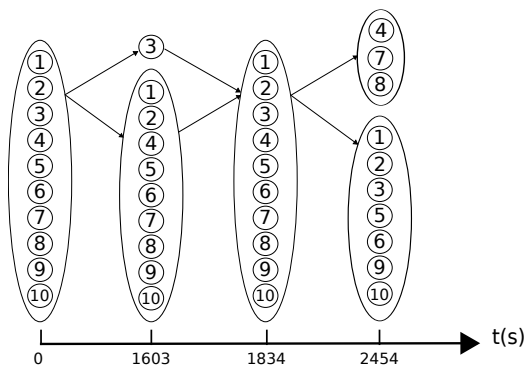
La période de mise à jour de l'algorithme est fixée à 400 ms, afin d'assurer une marge par rapport à la convergence obtenue de façon statique. La détection d'erreurs est assurée par le CRC-16 de la radio Atmel, les paquets erronés ne sont pas pris en compte. Les paquets radio émis par les nœuds sont constitués d'un total de 21 octets, soit une durée de transmission de $656\mu s$. L'ensemble des paquets reçus par les nœuds sont stockés sur le support micro-SD cards, ainsi qu'un ensemble d'informations additionnelles, telles que la mesure d'ED de chaque paquet reçu, l'instant local de réception, le nombre de paquets émis par seconde et la quantité de paquets erronés

reçus.

6.4.4 Déroulement de l'expérience et résultats

Nous expliquons dans un premier temps le déroulement de l'expérimentation, et les scénarios de mobilité mis en place. Nous analysons ensuite les performances sur la convergence obtenues avec notre algorithme, ainsi que son comportement dynamique lors des changements de topologie.

Conditions expérimentales



(a) Progression du groupe cycliste durant l'expérimentation. Les événements détectés (séparations, fusions) et la composition des groupes sont représentés.



(b) Capture d'écran de l'interface de visualisation, validant le suivi des deux groupes en direct, sur un fond de carte.

Figure 6.5 – Evolution de la topologie de la course, aperçu de l'interface de visualisation.

Comme nous l'avons expliqué plus haut, l'expérimentation a été conduite avec un groupe de 10 cyclistes, sur une boucle d'environ 2 km autour des locaux d'Euromedia, à Bry-sur-Marne. L'environnement peut être qualifié de semi-urbain, avec à la fois des espaces denses en bâtiments et des zones plus dégagées. L'ensemble a été testé durant une heure, ce qui nous a permis de valider l'ensemble de la chaîne de transmission, incluant la visualisation. Nous avons pu récupérer l'ensemble des données des capteurs, et nous focaliser sur deux points importants : le comportement du groupe complet stable, et des séparations dynamiques. Pour tester la stabilité du système, les coureurs sont restés dans un premier temps en groupe complet, avant que l'un d'entre eux s'éloigne puis revienne.

Ensuite, le groupe s'est divisé en deux jusqu'à la fin du test, chaque moto suivant l'une des deux formations. La progression de la topologie est donnée sur la figure 6.5, ainsi qu'un aperçu de l'interface permettant de valider le suivi en direct des coureurs. L'ensemble des événements décrits ont pu être détectés par notre plate-forme, ce qui

valide le fonctionnement du point de vue applicatif.

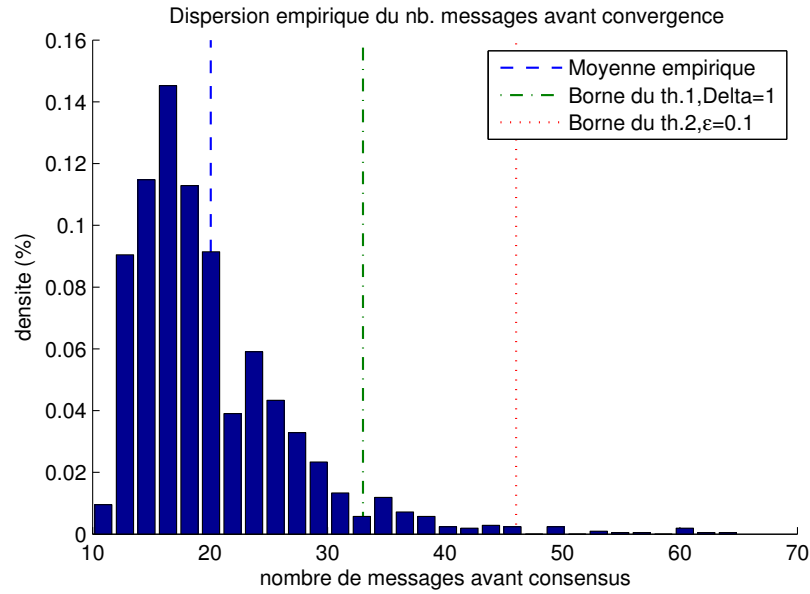
Performance du consensus

Nous nous intéressons tout d'abord à la première partie de l'expérimentation, soit $t \in [0; 1603s]$, durant laquelle les 10 coureurs font partie du même groupe, au sein duquel les distances relatives peuvent varier. Cette première phase est importante, pour valider nos algorithmes sur le graphe complet, avant d'étudier les cas dynamiques. Tout d'abord, nous notons qu'avec le protocole choisi, sur l'ensemble de cette période la perte de paquets globale est d'environ 22%, ce qui est lié à l'ensemble des facteurs (mouvement, masquage du corps, distance, environnement) présents sur ce genre d'application.

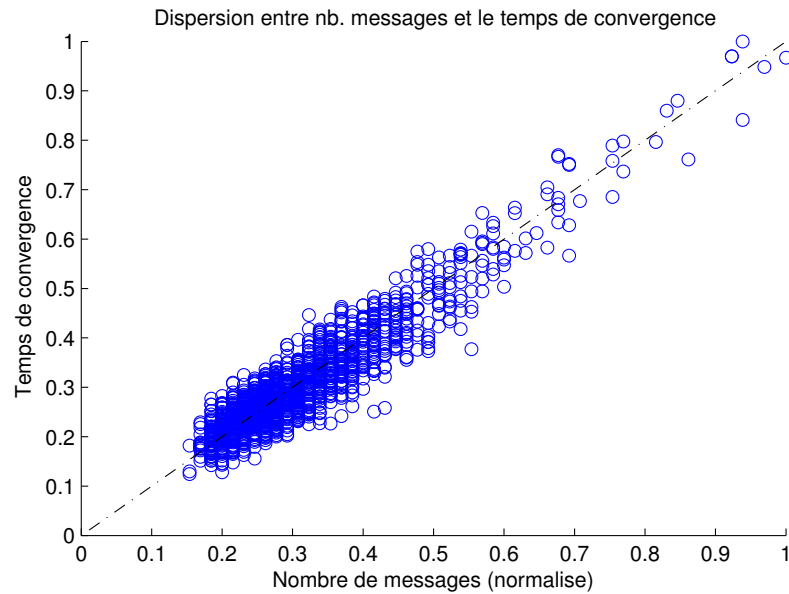
Nous cherchons alors à analyser les performances de notre algorithme, compte tenu de l'étude menée dans la section 6.2.2. Grâce aux données collectées, nous sommes en mesure de connaître la connectivité du réseau durant chaque période de consensus. Dans le cas du groupe complet, elle est donnée par le diamètre $1 \leq \Delta_C \leq 2$, ce qui signifie que presque tous les nœuds sont des partenaires directs, à un saut.

La figure 6.6a indique la densité de probabilité empirique, obtenue en pratique avec le groupe complet, du nombre de messages par période nécessaire pour obtenir la convergence du groupe. Celle-ci est confrontée aux bornes théoriques obtenues dans la section 6.2.2. On peut remarquer qu'en dépit de liens non fiables, la valeur moyenne de notre algorithme reste inférieure à la borne supérieure de l'espérance de convergence. Ceci peut s'expliquer par l'effet du protocole de type broadcast, mais également par le protocole CSMA/CA implémenté en pratique. En effet, compte tenu du système de backoff, l'hypothèse de sélection du nœud émetteur à chaque coup d'horloge, uniforme parmi N dans le cas théorique, correspondrait à un backoff nul, les nœuds ayant en permanence un paquet à émettre, tandis qu'en pratique un nœud attend en moyenne 35 ms entre deux émissions. La faible proportion du nombre important de messages nécessaires peut s'expliquer par des conditions momentanées, particulièrement défavorables pour certaines transmissions, incluant des tirages de backoff menant à des collisions, ou un ordre d'émissions aléatoires apportant des informations redondantes à chaque étape. Si l'on se réfère à la forme de la distribution empirique obtenue par simulation (figure 6.1b), nous constatons néanmoins qu'elle est comparable à celle obtenue en pratique.

Enfin, il est intéressant de mettre en relation le nombre de messages nécessaires à la convergence et la durée réelle que cela implique, compte tenu des paramètres du protocole. Le temps de convergence obtenu est compris entre 37 ms et 300 ms. Le nuage de points de la figure 6.6b indique la dispersion entre le nombre de messages et le temps de convergence (normalisés). Cette représentation appuie la relation



(a) Distribution empirique obtenue expérimentalement pour le nombre de messages avant convergence, $N = 10$, $\Delta_C \leq 2$.

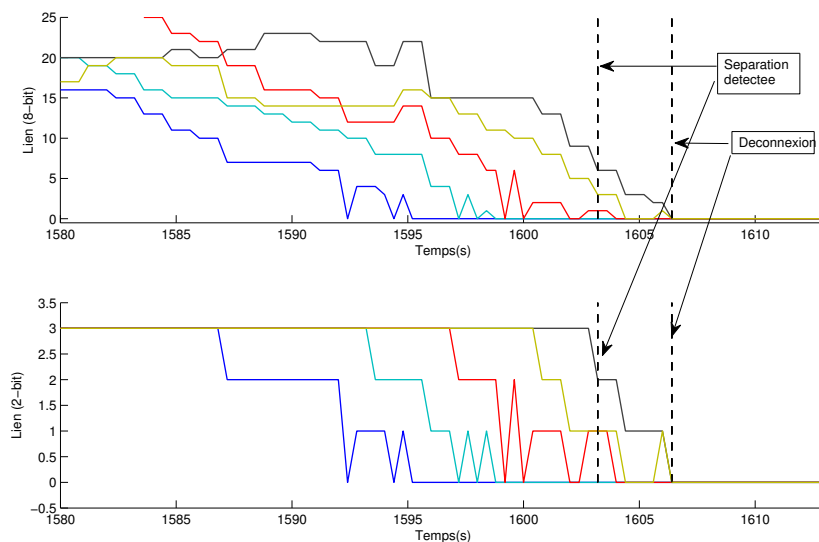


(b) Nuage de points représentant la dispersion entre le temps de convergence réel et le nombre de messages nécessaires pour son obtention.

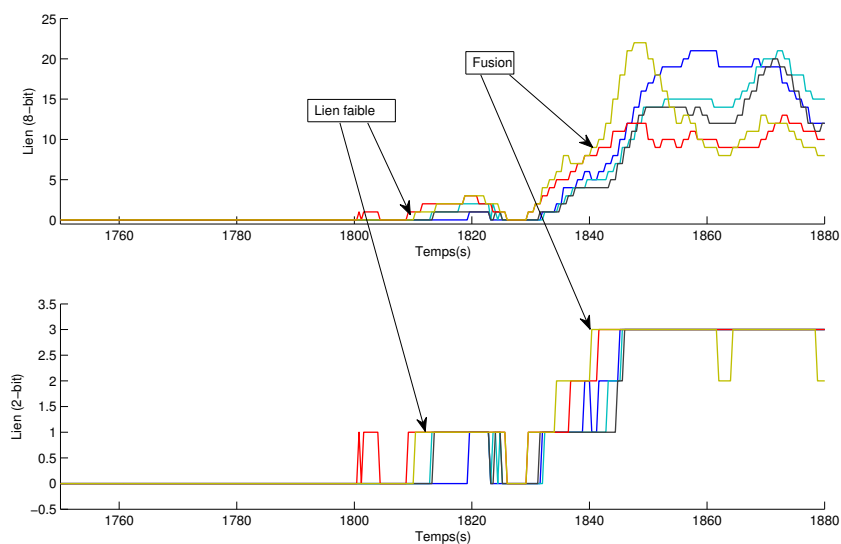
Figure 6.6 – Analyse des performances de convergence en conditions expérimentales.

générale de linéarité entre ces deux métriques, la dispersion étant liée à la séquence de transmission suivie par les nœuds, du fait des émissions aléatoires.

Evolution dynamique de la topologie



(a) Estimation dynamique de la proximité entre le nœud 3 et ses 5 plus proches voisins, lors de la phase de séparation du nœud 3 avec le groupe. Une courte phase de transition a lieu, durant laquelle les deux groupes sont détectés et partagent un faible lien, avant déconnexion complète.



(b) Estimation dynamique de la proximité entre le nœud 3 et ses 5 plus proches voisins, lors de la phase de fusion du nœud 3 avec le groupe. On observe une première phase, pour laquelle un lien faible apparaît, de façon intermittente, avant une nouvelle croissance des signaux, et la fusion des deux groupes.

Figure 6.7 – Analyse détaillée des phénomènes de séparation et de fusion des groupes.

Il convient à présent d'analyser le détail du comportement des canaux et du critère de proximité développé dans la section 6.4.2, afin de vérifier sa validité en situation pratique de séparation ou de fusion de groupes, bien que ceci ait déjà été effectué au niveau applicatif avec l'interface de visualisation. Nous choisissons ici d'observer les signaux obtenus lors du premier événement détecté, à savoir l'éloignement du nœud 3 avec le groupe principal.

Les figures 6.7a et 6.7b représentent la proximité mesurée de façon dynamique par le nœud 3 avec ses 5 plus proches voisins, lors de la phase de séparation, puis de fusion des deux groupes. Dans le premier cas, on peut constater la décroissance de l'estimation des liens, conduisant à la détection de la séparation dès lors que tous les liens (quantifiés sur 2 bits) sont inférieurs ou égaux à 2. Vient ensuite une courte phase de transition, durant laquelle subsiste un lien faible, avant déconnexion complète des deux groupes.

Dans le cas de la fusion, on peut observer lors du rapprochement des deux groupes une première phase comportant des liens faibles de façon légèrement intermittente. Cette instabilité peut être liée à divers facteurs : un rapprochement lent, avec une distance variable entre les groupes, des conditions particulières de transmission liées à l'environnement, influant sur la mesure d'ED, ou encore le passage par une courbe serrée, réduisant artificiellement la distance entre les nœuds. Cette instabilité n'apparaît pas néanmoins dans la fusion des groupes, qui est effectuée plus tard, dès lors qu'au moins un lien est supérieur ou égal à 3.

6.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble d'algorithmes permettant de réaliser une détection de groupes au sein d'un graphe dynamique, de manière complètement distribuée, en étendant le formalisme du max-consensus. Nous avons dérivé des bornes théoriques valides sur la convergence, qui ont également pu être vérifiées expérimentalement. L'inclusion d'un critère de proximité basé sur un lissage à long terme de la mesure d'ED de chaque lien, permet une estimation fiable de la topologie globale du réseau, en conservant l'information de connectivité de deux groupes considérés comme disjoints. Ces algorithmes, bien que testés dans un cadre expérimental particulier, peuvent s'avérer intéressants dans toute application, mobile ou statique, nécessitant une estimation "gros grain" de la topologie du réseau, consistant en des groupes partageant des caractéristiques communes, et permettent une collecte d'information complètement opportuniste.

Un important travail de développement a été réalisé afin de mettre au point la plate-forme pour une validation expérimentale de la chaîne de transmission complète

à petite échelle, qui s'est avérée concluante. Cette même plate-forme a par la suite été testée sur trois étapes d'une compétition de niveau international, le Critérium du Dauphiné 2013 [dau, 2013], épreuve préparatoire du Tour de France. Jusqu'à 20 coureurs ont été équipés pour ce test, quatre équipes s'étant portées volontaires, le suivi du groupe formé a pu être assuré tout au long des épreuves. Afin d'assurer au maximum le succès de ce second test, nous n'avons pas souhaité stocker d'informations sur les capteurs, évitant d'éventuels problèmes liés au stockage. Quoi qu'il en soit, les données obtenues sur les connectivités n'auraient eu que peu de signification, étant donné que les 20 coureurs étaient dispersés de façon non connue au milieu d'un groupe de 180 personnes non équipées, empêchant une caractérisation pertinente des communications.

Le succès de ce second test nous a néanmoins permis d'ouvrir la voie à l'adaptation de nos algorithmes pour l'échelle d'une course internationale complète, soit jusqu'à 200 coureurs. L'adaptation, ainsi que l'expérimentation à large échelle et l'analyse de nombreuses données collectées font l'objet du chapitre suivant de cette thèse.

7 Détection de groupes et caractérisation d'un réseau cycliste complet

Sommaire

7.1	Introduction	118
7.2	Objectifs applicatifs, passage à l'échelle complète	119
7.3	Extensions de l'algorithme	121
7.3.1	Synchronisation distribuée du réseau	121
7.3.2	Ajustement dynamique de la puissance d'émission	122
7.3.3	Réinitialisation du vecteur	123
7.3.4	Algorithme complet	125
7.4	Description de l'expérimentation	126
7.4.1	Collecte d'informations en direct	126
7.4.2	Données collectées	127
7.5	Analyse des résultats	128
7.5.1	Matrices d'adjacence dynamiques	129
7.5.2	Analyse de la convergence	129
7.5.3	Estimations du diamètre du graphe	132
7.5.4	Fiabilité des liens	133
7.5.5	Correlation entre ED et succès de transmission	134

117

7.5.6	Stabilité du voisinage	135
7.5.7	Corrélation de l'évolution du voisinage	137
7.5.8	Connexion avec les puits	138
7.6	Conclusion	140

7.1 Introduction

A travers le chapitre précédent, nous avons mené une étude théorique d'algorithmes de détection de groupes dynamiques basés sur le principe du max-consensus. Nous fournissons également les premiers résultats expérimentaux d'exploitation de l'algorithme complet dans un scénario original de suivi de groupes cyclistes. Le succès de l'expérience menée avec un petit nombre de nœuds (jusqu'à une vingtaine), nous a conduit à envisager le passage à l'échelle d'une course professionnelle complète, et des scénarios applicatifs se rapprochant d'épreuves comme le Tour de France.

Un tel changement d'échelle et de tels scénarios impliquent de nombreuses hypothèses nouvelles, sur la mobilité, la densité du réseau, l'impact de ces phénomènes sur les communications . . . pour lesquelles il n'existe pas réellement de modèles adaptés, permettant une première évaluation hors ligne de nos algorithmes. Si l'objectif général reste le même, nous verrons qu'un certain nombre d'adaptations sont nécessaires, malgré un manque de connaissance du réseau complet a priori, pour tenter de répondre à ces conditions expérimentales et assurer un suivi des groupes en direct.

Ensuite, un déploiement à large échelle tel que celui qui nous est proposé, nous donne l'opportunité d'obtenir de nombreuses connaissances sur le comportement du réseau complet. De premières estimations sur la mobilité, la densité, le comportement des communications à l'intérieur du réseau, le problème de l'évacuation des données vers les puits, sont des données essentielles dès lors que l'on souhaite améliorer les algorithmes existants, proposer une collecte d'informations plus précises sur les positions relatives, ou encore élaborer des modèles réalistes de communication.

Dans ce chapitre, nous précisons dans un premier temps les objectifs d'application que nous appréhendons ici, et les problèmes associés au passage à l'échelle complète, avant de décrire plusieurs adaptations de l'algorithme MGMC visant à répondre aux problèmes évoqués. Suite à ce travail préparatoire, nous avons pu valider la plateforme complète lors de la course Paris-Tours 2013 [par, 2013] et récupérer une grande quantité d'informations sur le réseau. Nous décrivons alors le contexte expérimental et le déroulement de l'épreuve, avant de fournir de nombreux résultats, tant sur nos algorithmes et la convergence que sur la caractérisation globale du réseau, ouvrant de

nombreuses pistes de réflexion quant à la suite du projet.

7.2 Objectifs applicatifs, passage à l'échelle complète



(a) Peloton très dense.



(b) Peloton très étiré.

Figure 7.1 – Exemples d’illustrations mettant en évidence les variations de densité du peloton pouvant avoir lieu durant une course cycliste.

Suite aux validations expérimentales à petite échelle, en interne puis lors de trois épreuves internationales, des algorithmes présentés dans le chapitre précédent, nous sommes à présent face à de nouveaux objectifs applicatifs. En effet, si le principe de base d’une détection de groupes mobiles basée sur un critère de proximité et un consensus entre les nœuds reste le même, nous cherchons à l’appliquer à un réseau composé de l’ensemble des participants d’une course cycliste internationale, soit jusqu’à 200 coureurs.

Le passage à une échelle telle qu'un peloton cycliste complet soulève un certain nombre de problèmes quant à l'adaptation des algorithmes de détection de groupes mis au point. En effet, si les algorithmes présentés dans le chapitre précédent ont l'avantage d'être complètement distribués, sans structure hiérarchique, et permettent une collecte d'informations opportuniste par les puits, le comportement des communications entre une vingtaine de coureurs et un nombre pouvant aller jusqu'à 200 devient très différent.

Plusieurs éléments nouveaux nécessitent d'être pris en compte. Si lors de l'expérimentation précédente, les nœuds d'un même groupe se trouvaient tous à une distance faible (rappelons que $\Delta_C \leq 2$), du fait de la proximité géographique des coureurs cyclistes, l'*étendue* du groupe complet risque ici d'être beaucoup plus importante. Du fait du nombre et de l'étendue, le temps de convergence de la détection et le nombre de messages nécessaires pour l'obtenir risquent d'être considérablement accrus. De plus, la propagation de l'information de remise à zéro du groupe mobile depuis une balise extérieure peut s'avérer non négligeable, selon le nombre de sauts à parcourir pour couvrir l'ensemble du réseau. Selon la configuration du peloton, l'étendue géographique peut également présenter de très fortes variations. Quelques observations sur la mobilité cycliste, illustrées par la figure 7.1 montrent que le peloton complet peut présenter un front occupant toute la largeur de la route en ligne droite, alors que dans certains cas la formation peut s'étirer jusqu'à former une seule file de coureurs.

Si cet aspect concerne la mobilité globale, la *mobilité relative* entre les nœuds au sein du peloton peut être également très importante, et de ce fait les contacts entre les nœuds peuvent rapidement varier. La mobilité dans ce contexte particulier s'avérant complexe à modéliser, nous chercherons davantage à proposer des méthodes simples permettant l'adaptation la détection de groupes à ces contraintes. De plus la collecte de données de terrain issues de l'expérimentation permettra de caractériser le comportement du réseau mobile, en vue de la réalisation d'un modèle dédié, que nous aborderons dans la conclusion de cette thèse.

Conjointement au problème de mobilité et de topologie, qui relève de l'aspect applicatif, vient celui des communications dans un tel réseau. En effet, nous sommes en présence d'un multi-BAN pouvant s'avérer *extrêmement dense*. Si un protocole entièrement *broadcast* permet par sa nature un processus complètement coopératif et donc d'atténuer l'effet des pertes dues au masquage, les émissions aléatoires à des cadences élevées en environnement dense peuvent conduire à de nombreuses collisions. C'est le cas par exemple lorsque plusieurs nœuds décident de transmettre au même instant après une détection de canal libre, ou bien lorsqu'un canal est détecté libre du fait d'un masquage temporaire. Nous tâcherons, en l'absence de modèle de transmission réaliste, de proposer une méthode simple permettant d'adapter le réseau aux variations de la densité. Là encore, une analyse du comportement des communications du groupe complet à densité variable peut être apportée par les

multiples informations collectées durant l'expérimentation. L'extension directe de l'algorithme à un groupe complet entraîne également une augmentation considérable des données transitant sur le réseau, chaque paquet, de taille fixe, devant comporter une quantité d'informations proportionnelle à N , le nombre total de coureurs.

L'ensemble de ces nouveaux paramètres sont difficilement quantifiables a priori. Plusieurs adaptations de l'algorithme MGMC sont néanmoins présentées dans la section suivante, visant à limiter les effets des variations du réseau dues à la mobilité.

7.3 Extensions de l'algorithme

7.3.1 Synchronisation distribuée du réseau

Avec l'algorithme MGMC décrit dans le chapitre précédent, le vecteur B^v est périodiquement réinitialisé lors de la réception de balises émises par des puits mobiles. Au cours d'une époque K , suite à une durée T_E , une nouvelle époque $K + 1$ est transmise dans une balise par un puits mobile. Cette nouvelle époque est propagée à l'ensemble du réseau par multi-saut: à la réception de l'époque $K + 1$, chaque nœud v met à jour son indicateur d'époque et démarre un nouveau vecteur $B^v[K + 1]$. Un max-consensus opère sur le réseau, et tous les nœuds s'adaptent à l'époque $K + 1$. Nous expliquons dans cette section comment nous généralisons cette synchronisation du réseau par une méthode complètement distribuée, sans nécessiter de balise extérieure. Deux avantages à cette approche : les nœuds n'ont pas besoin des puits pour exécuter l'algorithme et mettre à jour périodiquement l'information de groupe, et le temps nécessaire à la propagation de la nouvelle époque par multi-saut est amélioré.

Soit $t_v(t)$ l'information d'horloge interne du nœud v à l'instant t . Soit k_v l'indicateur local d'époque de chaque nœud v , et t_{kv} l'instant stocké en interne correspondant au démarrage de l'époque k_v pour le nœud v . Notre méthode de synchronisation distribuée est la suivante : si le nœud v ne reçoit pas de nouvelle époque sur l'intervalle de temps $[t_{kv}; t_{kv} + T_E]$, il décide lui-même d'initier une nouvelle époque $k_v + 1$, et de la propager à l'ensemble du réseau. L'instant local de démarrage de cette époque devient alors $t_{kv} = t_v(t)$. Lorsqu'un nœud v reçoit à l'instant t une nouvelle époque $k_j > k_v$ d'un nœud j , il adopte et diffuse k_j et stocke l'instant local $t_{kv} = t_v(t)$. Si cette nouvelle époque survient trop tôt, c'est-à-dire $t_v(t) \leq t_{kv} + \alpha T_E$ (α est une valeur de garde fixée en pratique à $1 - T_E/T$), la réinitialisation du vecteur B^v est effectuée lors du passage à l'époque suivante.

La durée T_E est fixée à 1 seconde en pratique, ce qui correspond au taux de rafraîchissement souhaité pour l'application. L'information d'époque est limitée à 8 bits, ce qui entraîne un bouclage à 0 toutes les 256 secondes. Un mécanisme simple

prend ce fait en compte : si une transition importante a lieu entre k_v et k_j vers une faible valeur d'époque, la valeur k_j est considérée en avance et adoptée par le nœud v .

Le pseudo-code pour la décision de mise à jour individuelle est donnée à la fin de l'algorithme 7.4, elle consiste en une routine d'interruption sur l'horloge locale, déclenchée dès lors que $t_v = t_{kv} + T_E$. La synchronisation par un autre nœud est donnée par la fonction 7.1. Notons que l'initialisation de B^v est donnée dans la section 7.3.3.

Function 7.1 SYNCHRONISATION PAR UN AUTRE NŒUD

(Lors de la réception du paquet $P = \{k_j, B^j\}$ du nœud j)

Si $k_j > k_v$ // adaptation de l'époque

$k_v = k_j$

Si $t_v \geq t_{kv} + 0.9T_E$ // la réinitialisation n'arrive pas trop tôt
initialiser B^v // fonction 7.3

Fin Si

$t_{kv} = t_v(t)$ // mise à jour de l'instant local de reset

Fin Si

7.3.2 Ajustement dynamique de la puissance d'émission

Comme nous l'avons vu, la mobilité physique d'un peloton cycliste complet entraîne des variations considérables de la densité du réseau, la largeur du peloton (en nombre de coureurs côte à côte) pouvant aller de 1, dans les phases d'étirement, à 15 en formation serrée. Compte tenu du nombre important de nœuds partageant le même canal radio dans un espace réduit, et de la portée des transmissions, de quelques dizaines de mètres à la puissance maximale, il faut s'attendre, en peloton serré, à de nombreuses collisions du fait des émissions suivant un protocole aléatoire. A l'inverse, lors d'une phase d'étirement, le diamètre du graphe augmentant, le taux de collisions va tendre à se réduire, mais la diffusion de l'information d'un bout à l'autre du graphe sera ralentie.

Il devient alors nécessaire, pour limiter ces phénomènes, d'adapter la portée des nœuds de façon dynamique, en ajustant la puissance d'émission en fonction de la densité. La densité n'étant pas directement mesurable, on peut admettre une forte corrélation entre celle-ci et la taille du voisinage de chaque nœud. De ce fait une métrique aisément disponible est alors le degré de chaque nœud. Une mesure simple du voisinage d_v du nœud v est donnée par le nombre de sources différentes reçues au cours d'une époque. On définit un vecteur booléen $D^v(k)$ à chaque époque k , pour lequel la composante $D_j^v(k) = 1$ si le nœud v a reçu au moins un paquet du nœud j durant l'époque k . L'estimation du voisinage à chaque époque k est alors définie

par $d_v(k) = \sum_{n=1}^N D_n^v(k)$. Si $d_v(k)$ ou $d_v(k-1)$ s'avère supérieur à un seuil t_d , le nœud v fixe sa puissance d'émission à une valeur plus faible, et inversement. Le détail de l'ajustement de la puissance d'émission est donné par la fonction 7.2.

Pour l'expérimentation décrite dans ce chapitre, nous avons défini un ajustement à deux niveaux, $\{-9; 3\}$ dBm, avec un seuil de voisinage fixé à $t_d = 30$. La valeur de 3 dBm est le maximum fourni par la radio. Le niveau inférieur, -9 dBm, est déterminé grâce aux données expérimentales obtenues dans le chapitre précédent. Cette valeur permet en effet de conserver un taux de réception élevé pour des voisins très proches (situés dans un rayon équivalent à deux longueurs de vélo), la réception se dégradant rapidement au-delà de ce périmètre. Enfin, un seuil de voisinage $t_d = 30$ correspond à une estimation du nombre de voisins pouvant se trouver, en situation de forte densité, dans un tel périmètre.

Function 7.2 AJUSTEMENT DE LA PUISSANCE D'ÉMISSION

```

recevoir le paquet  $P = \{k_j, B^j\}$  du nœud  $j$ 
Si  $k_j > k_v$  // nouvelle époque
     $d_v(k_v - 1) = d_v(k_v)$  // stocker la valeur de voisinage précédente
     $k_v = k_j$  // mettre à jour l'époque
    reset  $D^v$  // réinitialiser l'info. de voisinage
     $d_v(k_v) = 0$ 
Fin Si
 $D_j^v = 1$ 
 $d_v(k_v) = \sum_{n=1}^N D_n^v$  // calculer le voisinage courant
Si  $(d_v(k_v) \geq t_d)$  ou  $(d_v(k_v - 1) \geq t_d)$ 
     $P_{tx} = P_{low}$  // voisinage élevé  $\Rightarrow$  faible puissance
Sinon
     $P_{tx} = P_{high}$  // voisinage faible  $\Rightarrow$  puissance élevée
Fin Si

```

7.3.3 Réinitialisation du vecteur

Dans l'algorithme MGMC présenté dans le chapitre précédent, à la réception d'une nouvelle époque, chaque nœud v réinitialise son vecteur B^v à la valeur 1 pour la composante v et 0 pour les autres. Nous proposons de modifier cette initialisation pour accélérer le processus de convergence. Cette nouvelle initialisation est réalisée en utilisant les indices de proximité calculés par le nœud v , et consiste à pré-remplir le vecteur B_v avec l'ensemble de son voisinage calculé proche. Cette méthode est donnée par la fonction 7.3. L'indice de proximité est ici calculé de la même manière qu'expliqué

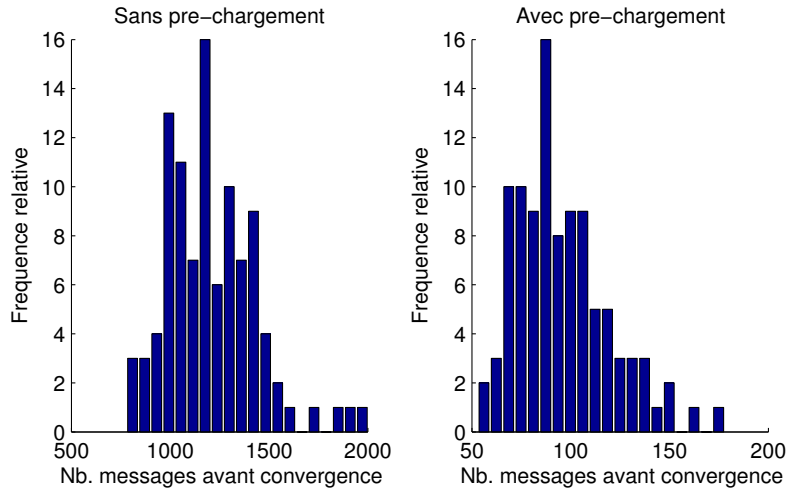


Figure 7.2 – Comparaison simulée des performances de l’algorithme MGMC avec et sans pré-chargement des vecteurs, pour des réseaux statiques ($N = 200, \Delta = 5$).

dans le chapitre précédent. La figure 7.2 présente les performances obtenues par simulation avec cette méthode, pour des réseaux statiques ($N = 200, \Delta = 5$). La méthode que nous proposons dans cette section donne un gain sur le nombre de messages échangés supérieur à 10. En effet, une fois l’établissement des liens effectué (régime stable), il n’est pas nécessaire que tous les nœuds émettent pour atteindre la convergence, c’est pourquoi on obtient des valeurs inférieures à N . En pratique, des émissions régulières de tous les nœuds sont réalisées, car nécessaires au calcul des informations de proximité, et le gain sur le nombre de messages sera moindre; toutefois, compte tenu de l’évolution supposée lente des voisinages en regard de la convergence, l’accélération apportée par cette méthode reste conséquente.

Function 7.3 INITIALISATION DU VECTEUR

(Fonction appelée lors de la propagation d’un signal de reset)

```

 $B_v^v = M$ 
Pour tout  $j \neq v$ 
    calculer  $proxim(j) = f(RSSI)$ 
    Si  $proxim(j) \geq Seuil$ 
         $B_j^v = M$ 
    Fin Si
Fin Pour
    
```

7.3.4 Algorithme complet

Nous donnons ici l'algorithme MGMC complet, augmenté des améliorations décrites plus haut. Afin de réduire l'écriture, les nouvelles fonctions sont appelées depuis l'algorithme, leur forme développée étant donnée dans les paragraphes précédents. La temporisation régulant l'émission des paquets est cette fois-ci composée d'une composante fixe T_0 et d'une composante aléatoire T_b , ce qui permet d'obtenir un taux d'émission des paquets par époque relativement uniforme. En pratique, on donne $T_0 = 100ms$ and $T_b = 20ms$, ce qui assure une moyenne un taux d'émission de 8.5 paquets/s par nœud . Par cette méthode, le taux d'émission est amené à varier naturellement en fonction de la densité, et on observera de 7 à 8 paquets/s pour un graphe au plus dense, 9 à 10 paquets/s pour des densités plus faibles.

Algorithm 7.4 MOBILE GROUP MATE CONSENSUS

(Exécuté sur chaque nœud v)

Initialiser $B^v = \mathbf{0}$

Initialiser $B_v^v = 1$

Initialiser k_v à 0

Initialiser t_{kv} à $t_v(t)$

Répéter indéfiniment

$T_{max} = T_0 + random(0 - T_b)$

Tant que T_{max} *n'a pas expiré*

recevoir le paquet $P = \{k_j, B^j\}$ du nœud j

appeler la fonction 7.1 // mise à jour de l'époque et réinitialisation ?

appeler la fonction 7.2 // ajustement de la puissance

$proxim = f(RSSI)$

Si ($proxim \geq Seuil$)

$B^v = Max(B^v, B^j)$

Fin Si

Fin Tant que

$broadcast(\{k_v, B^v\})$

indéfiniment

(routine d'interruption: décision individuelle de mise à jour)

Quand $t_v == t_{kv} + T_E$

$k_v = k_v + 1$ // initialisation d'une nouvelle époque

initialiser B^v // fonction 7.3

$t_{kv} = t_v(t)$ // conserver l'instant local de nouvelle époque

Fin Quand

7.4 Description de l'expérimentation

Nous décrivons ici le cadre expérimental mise en place pour la validation de l'algorithme de détection de groupes à large échelle décrit dans la section précédente. Comme nous l'avons expliqué, l'objectif, outre le suivi d'un groupe cycliste complet en direct, est également une collecte d'importantes quantités d'informations permettant de caractériser le réseau dans sa globalité. Après un rappel de la plate-forme mise en œuvre, nous expliquons le déroulement de l'expérimentation et décrivons les données collectées.

7.4.1 Collecte d'informations en direct

Tout d'abord, la plate-forme mise en œuvre est le cas étendu de la plate-forme générale décrite en section 5.6. Elle est précisée sur la figure 7.3. Le nombre total de nœuds est potentiellement ici de 200, en réalité 187 vélos sont chacun équipés d'un nœud HiKoB FOX. Le réseau de collecte mobile est constitué cette fois de 3 puits (HiKoB LION) situés sur les motos image, l'une se trouvant en tête de course, les deux autres encadrant le peloton.

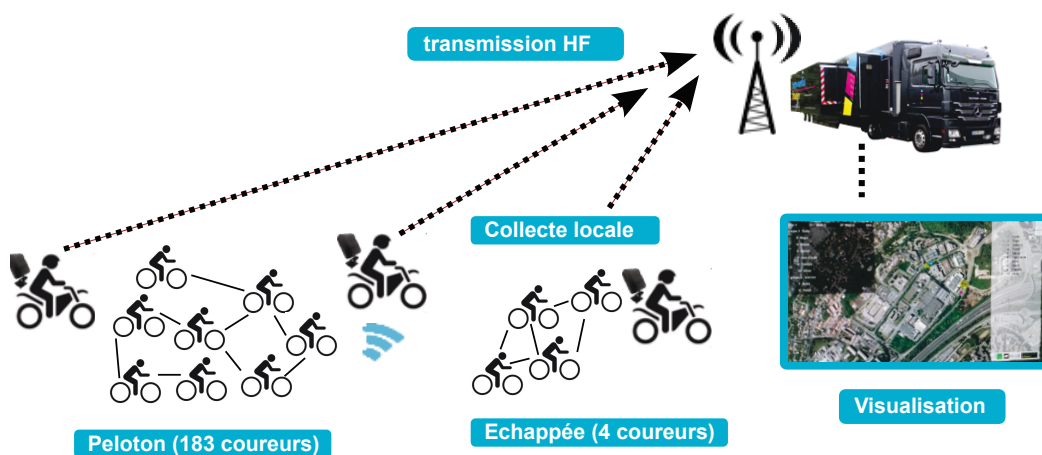


Figure 7.3 – Illustration de la plate-forme mise en œuvre lors de l'expérimentation réalisée sur la course Paris-Tours 2013. Le principal scénario capté (4 échappés, 183 coureurs dans le peloton) est illustré ici.

Nous avons eu l'opportunité d'évaluer notre plate-forme lors de la course internationale Paris-Tours 2013 [par, 2013]. La validation qualitative de la plate-forme est

assurée par une interface de visualisation développée par HiKoB, vérifiant le suivi des groupes en direct, avant l'intégration dans un flux vidéo télévisuel, réalisée par la société Symah Vision. Dans ce cadre expérimental, la diffusion au public n'a pas été effectuée, la validation ayant eu lieu en interne.

L'ensemble des nœuds ont pu être localisés durant toute la durée de la course. Partant d'un peloton complet de 187 coureurs, 4 d'entre eux se sont rapidement échappés, de ce fait la plupart du temps le peloton était composé de 183 cyclistes, avec des configurations variables, jusqu'à ce qu'un groupe de poursuivants se forme, durant la dernière demi-heure de la course, absorbant l'échappée originelle.

7.4.2 Données collectées

La collecte d'une importante base de données issue d'un déploiement à large échelle est très intéressante, mais tend à compliquer l'analyse. Outre l'aspect logistique, tel que l'équipement de l'ensemble des nœuds et la manipulation de 200 cartes μ SD, ceci peut également conduire à des besoins calculatoires et des traitements conséquents, notamment le recalage temporel de l'ensemble des échanges de messages, ou des calculs portant sur l'ensemble du graphe. Nous avons donc décidé d'équiper un sous-ensemble de 20 nœuds *loggers*, soit environ 11% du graphe dynamique complet, ceux-ci ayant pour tâche, outre l'application de détection de groupe, d'enregistrer l'ensemble des événements les concernant (émission, réception, timestamps...). Ces nœuds spéciaux ont enregistré pour une durée de 30 minutes, afin d'assurer leur durée de vie durant toute la course.

En raison de l'importante quantité de messages échangés, nous n'avons pas stocké à chaque réception l'intégralité du vecteur de 200 bits reçu, cela aurait eu pour conséquence une durée trop importante passée à écrire sur la carte. Nous avons donc préféré limiter le stockage en extrayant des données pertinentes des vecteurs reçus. Dans un souci de clarification, nous donnons, dans le tableau 7.1, l'ensemble des informations enregistrées par le nœud v , lors de chaque réception d'un message émanant de tout autre nœud j .

Rappelons tout d'abord que la métrique ED est celle fournie par la radio Atmel, et consiste en une moyenne du RSSI sur les 8 derniers symboles reçus. Lors de la réception d'un vecteur B , les informations extraites sont la quantité d'*informations utiles*, c'est-à-dire le nombre de nœuds dont la présence est détectée dans B^j qui n'étaient pas encore présents dans B^v . Nous récupérons également le nombre total de nœuds présents dans B^j .

Nous récupérons également les informations des messages provenant de sources considérées hors du périmètre de proximité. Ceci conduit à définir les notions de *voisinage proche*, par opposition au *voisinage étendu*. Ainsi, à chaque époque, le

voisinage proche d'un nœud est constitué de l'ensemble des nœuds tels que l'indice de proximité moyen calculé pour ceux-ci est supérieur au seuil de détection. Le voisinage étendu est quant à lui plus vaste, car il est constitué de l'ensemble des nœuds pour lesquels au moins un message a été reçu durant l'époque considérée.

Données enregistrées	Valeurs
Source	[0-199]
Epoque	[0-255]
Indice de paquet dans l'époque courante	[1-10]
Puissance d'émission	{-9;+3} dBm
Instant local de réception	32 bits, horloge à 32 kHz
Mesure de proximité	[0-255]
Energy Detection (ED)	[-91;-8] dBm
Total de nœuds détectés dans le vecteur reçu	[0-199]
Nb. d'informations utiles dans le vecteur reçu	[0-199]

Table 7.1 – Données enregistrées lors de chaque réception de paquet radio.

7.5 Analyse des résultats

Information	Moyenne	Médiane	Ecart type.
Temps de convergence (s)	0.27	0.25	0.13
# messages utiles avant convergence	9.4	9.5	2.6
# messages reçus avant convergence	43	40	22.5
Estimation du diamètre du peloton	7.4	7	1.9
Estimation de la taille du peloton	166	168	7.8
Voisinage proche d'un nœud	30	31.5	12.5
Voisinage étendu d'un nœud	36	36.7	13.8

Table 7.2 – Résumé d'un ensemble de résultats sur le consensus et le réseau global.

Nous montrons dans cette section que les informations enregistrées, pouvant être considérées comme un sous-ensemble du graphe complet, nous permettent de valider le mécanisme de consensus, mais également de déduire d'importantes informations sur le comportement global du graphe dynamique formé par le réseau. La demi-heure durant laquelle les loggers ont enregistré correspond à la phase durant laquelle le peloton est composé de 183 nœuds, tous les loggers étant situés dans le peloton.

Le tableau 7.2 présente une vue d'ensemble d'un certain nombre de caractéristiques extraites et analysées plus en détail dans les paragraphes suivants. Ce résumé aborde certains aspects du consensus, tel que le temps de convergence, les messages utiles, ainsi que du réseau global, comme le diamètre, la taille, ou le voisinage.

7.5.1 Matrices d'adjacence dynamiques

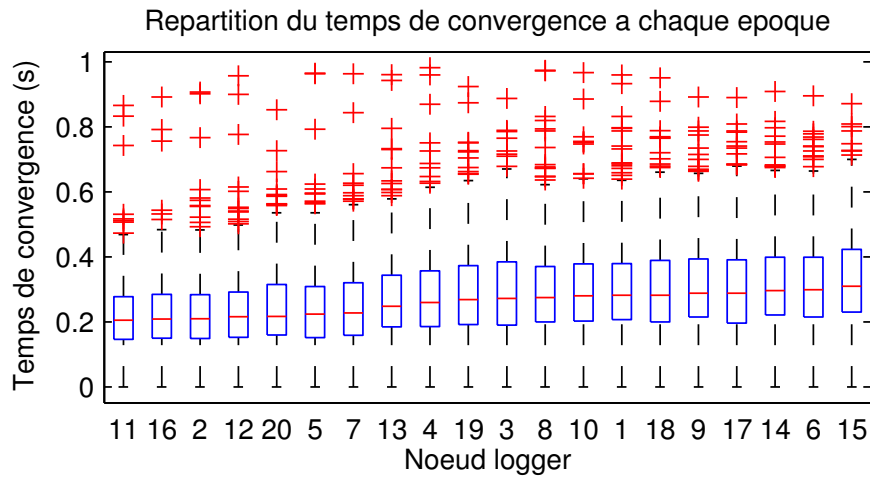
Compte tenu des voisinages étendus élevés (36 voisins en moyenne), tous les nœuds sont les voisins d'au moins un logger. Les interactions entre les nœuds à l'échelle d'une époque sont définies selon 3 critères : le nombre de paquets reçus, la proximité moyenne et la mesure moyenne de l'ED sur une époque. Ces interactions peuvent être formalisées par la définition de 3 matrices d'adjacence A_p , A_d and A_w . Soit $p_{vj}(k)$ le nombre de paquets émis par un nœud j , reçus par le logger v durant l'époque k , $d_{vj}(k)$ et $w_{vj}(k)$ sont respectivement la mesure de proximité moyenne et la mesure d'ED moyenne entre les nœuds v et j au cours de l'époque k . On définit alors les matrices $A_p(k) = (p_{ij}(k))_{i,j}$, $A_d(k) = (d_{ij}(k))_{i,j}$, $A_w(k) = (w_{ij}(k))_{i,j}$, de dimensions 200×200 .

Ces matrices permettent de suivre l'évolution du graphe sous-échantillonné selon chacun des critères. Il est alors possible d'appliquer des seuils, respectivement th_p , th_d et th_w à ces matrices, si l'on souhaite par exemple considérer uniquement les liens dont la proximité est supérieure à th_d , on peut alors définir $A_{d,ij} = 0$ si $d_{ij} < th_d$. Comme ces matrices contiennent uniquement des valeurs collectées par les loggers, elles s'avèrent très creuses, et les informations qu'elles contiennent sont vraies uniquement pour les loggers. Néanmoins, le fait que les loggers puissent tous communiquer à chaque instant avec un ensemble de nœuds significatif, nous utiliserons ces matrices pour estimer des propriétés du graphe complet.

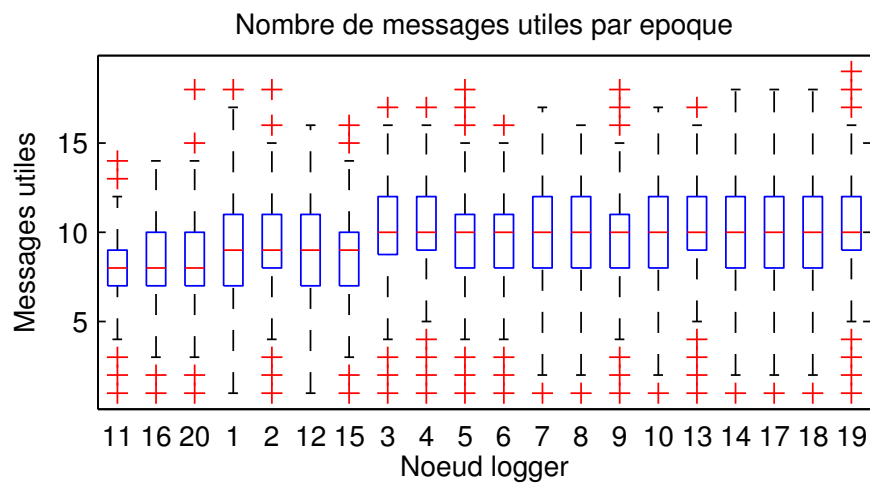
7.5.2 Analyse de la convergence

Nous proposons d'analyser dans un premier temps le mécanisme d'agrégation de données conduisant au consensus distribué du groupe à chaque époque. Pour ce faire, nous avons sélectionné dans les données collectées une durée de 10 minutes, entre $t = 400s$ et $t = 1000s$, durant laquelle l'ensemble des 183 nœuds sont présents dans le peloton et la convergence est assurée. Le reste du temps, un groupe possiblement situé en queue de peloton présente une connexion intermittente avec le groupe principal, ce qui empêche de conclure sur le temps de convergence de l'ensemble.

Les figures 7.4a et 7.4b sont des diagrammes en boîte présentant la répartition statistique du temps de convergence et du nombre de messages utiles pour chaque logger sur la période sélectionnée. La représentation sous forme de tels diagrammes peut être expliquée ainsi : la barre rouge représente la valeur médiane du paramètre étudié, la "boîte" bleue étant bornée par les premier et troisième quartiles ($Q1$ et $Q3$); les segments noirs s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes de la distribution n'étant pas considérées comme des points aberrants (en anglais *outliers*), les points aberrants sont alors représentés par les croix rouges. Les informations sur la convergence sont rangées par ordre de médiane ascendante. Nous soulignons ici que l'ensemble des nœuds montrent des propriétés statistiques très similaires, avec notamment une



(a)



(b)

Figure 7.4 – Répartition statistique (diagrammes en boîte) du temps de convergence et du nombre de messages utiles par époque (20 nœuds loggers nodes, 600 échantillons par nœud). La marque rouge est la médiane, la boîte bleue est bornée par les premier et troisième quartiles. Les points rouges sont des réalisations statistiquement aberrantes (outliers).

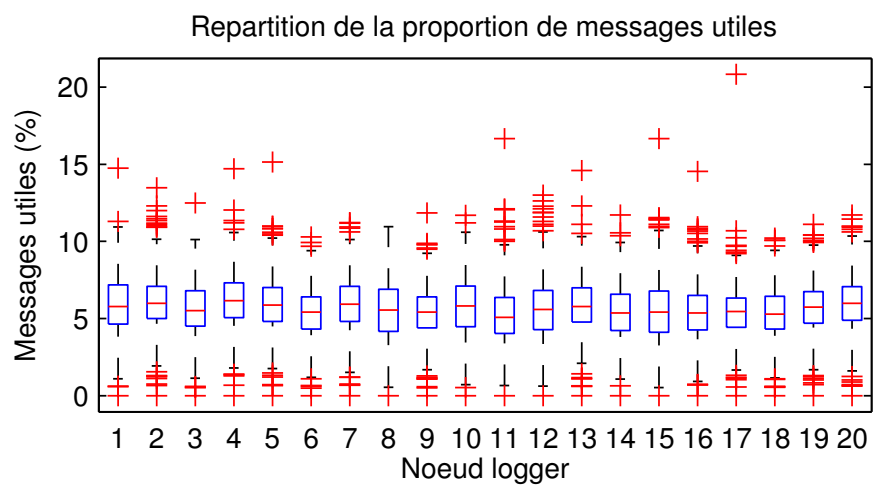
valeur médiane du temps de convergence autour de 300 ms, et des valeurs extrêmes comprises entre 500 et 700 ms. Quelques outliers sont présents, mais en très faibles proportions.

Il est également intéressant d'étudier ce que représentent les messages utiles par rapport à l'ensemble des messages reçus. La figure 7.5 présente la proportion de messages utiles reçus dans une période par chaque logger, qui s'avère faible. Ceci peut être un effet de la réinitialisation décrite dans la section 7.3.3. Le fait de pré-charger les

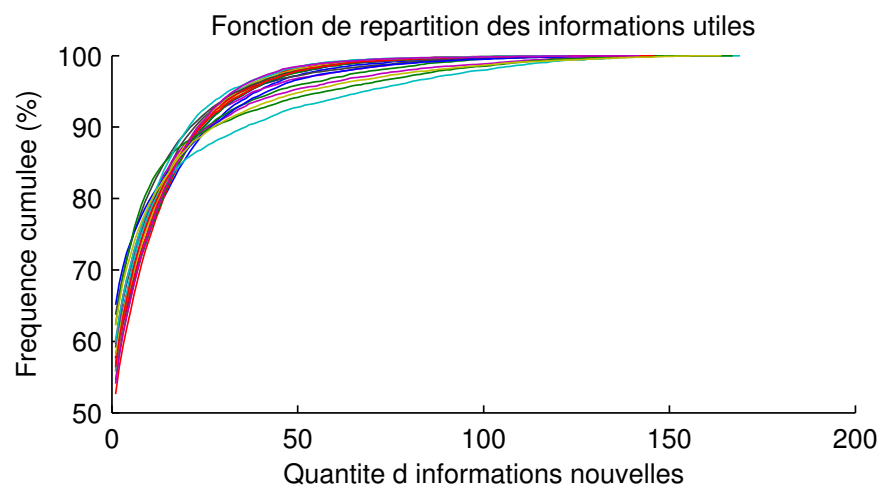
vecteurs avec le voisinage précédent entraîne

La figure 7.5b présente également la quantité d'informations nouvelles contenues dans chaque message utile. Les fonctions de répartition sont très similaires entre tous les nœuds. Dans la plupart des cas (90%) la nouvelle information apportée par un message utile est inférieure à 20 nœuds.

Dès lors que l'on s'intéresse à la convergence du réseau, on peut remarquer de très forte similarités entre les 20 nœuds loggers, ce qui laisse à penser que ces résultats peuvent être étendus à l'ensemble du graphe.



(a)



(b)

Figure 7.5 – Représentations statistiques de la proportion de messages utiles et de l'information apportée par ceux-ci.

7.5.3 Estimations du diamètre du graphe

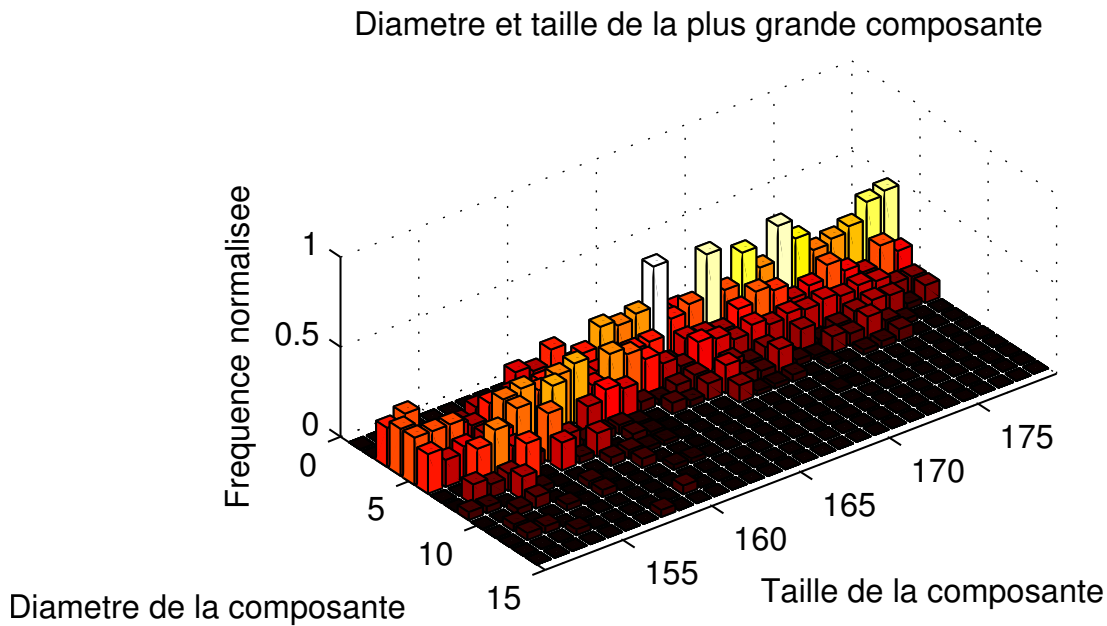


Figure 7.6 – Distribution du diamètre de la plus grande composante connexe, en rapport avec sa taille. La fréquence est ici normalisée sur la dimension de la composante connexe. Les couleurs claires représentent les fréquences élevées.

Compte tenu des matrices d'adjacence dynamiques présentées précédemment, nous pouvons maintenant définir le *voisinage proche* des loggers, c'est-à-dire le sous-ensemble de nœuds capables de communiquer avec ceux-ci. Nous utilisons cette notion pour estimer le diamètre du graphe, en conservant la notion de voisinage définie par les algorithmes (section 7.3). Nous utilisons donc la matrice A_d en lui appliquant le même seuil que dans l'expérimentation ($th_d = 4$) pour identifier les voisins proches. Ce choix nous donne un graphe très connecté, puisqu'au moins 80% des nœuds sont voisins d'au moins un logger à chaque époque, ce qui montre que 20 nœuds loggers répartis dans le réseau donnent une couverture proche de la totalité du graphe. Nous estimons maintenant la taille et le diamètre du graphe donné par les matrices d'adjacence.

Un algorithme de *parcours en profondeur* nous permet de détecter l'ensemble des composantes connexes du graphe et de calculer le diamètre associé à chaque époque. Par exemple, si deux loggers v et j ne sont pas des voisins directs à 1 saut, s'ils ont au moins un voisin k en commun, on considère que v , j et k sont membres de la même composante, et l'on peut calculer le diamètre de ce sous-ensemble.

La figure 7.6 est un histogramme 3-D, mettant en valeur l'interaction entre la taille et le diamètre de la plus grande composante connexe du graphe (avec une taille

supérieure à 150 nœuds). La fréquence est normalisée pour chaque taille de composante. On peut dans un premier temps observer que le diamètre calculé varie principalement entre 5 et 12, mais peut également atteindre des valeurs plus élevées. Cette figure montre également que la probabilité d'obtenir un diamètre plus faible lorsque la taille de la composante augmente, et inversement. Ceci peut être vu comme un effet de la densité variable du graphe : lorsque le peloton est dense, les degrés de connectivité sont plus élevés, ce qui réduit le diamètre du graphe pour une composante connexe plus grande. A l'inverse, l'étirement du peloton tend à réduire le degré de chaque nœud, et augmenter le nombre de sauts nécessaires pour communiquer d'un bout à l'autre du réseau. L'ensemble de ces informations donnent une estimation de l'évolution et de l'amplitude du diamètre du graphe, et sont importantes pour la mise au point de modèles et de méthodes de collecte plus élaborées.

7.5.4 Fiabilité des liens

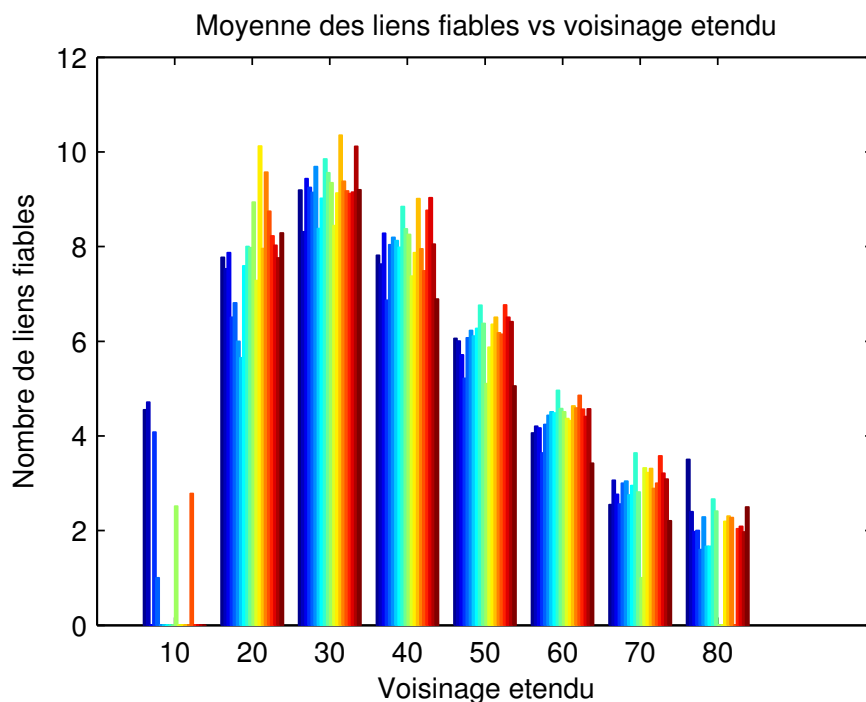


Figure 7.7 – Nombre moyen de liens fiables (réception $\geq 6p/s$) en rapport avec le voisinage étendu. Chaque barre de couleur de l'histogramme représente le paramètre mesuré pour chaque nœud logger.

S'il est courant de considérer les effets négatifs du corps en mouvement, de la densité des nœuds conjointe à la fréquence d'émission, sur le succès des communications, cette notion est très difficile à estimer a priori dans le cadre applicatif qui nous concerne. Les données collectées nous permettent alors d'estimer dans une certaine

mesure la fiabilité des liens avec les loggers en conditions expérimentales.

En utilisant la matrice d'adjacence basée sur le nombre de paquets reçus A_p , il est possible de savoir pour chaque époque le nombre de voisins de chaque logger pour lesquels on obtient un taux de réception supérieur à un seuil th_p . Chaque nœud transmettant en moyenne 8.5 paquets par seconde, on définit un lien *fiable* comme étant un lien assurant un taux de réception d'au moins $th_p = 6$ paquets par seconde. Le nombre de liens fiables par seconde constitue ici notre mesure de fiabilité.

Si cette mesure est intéressante en elle-même, il est important de la confronter à l'estimation de densité du réseau, pour étudier son impact. Cette mesure est représentée sur la figure 7.7. La fiabilité moyenne est donnée pour chaque logger (chaque barre de couleur de l'histogramme est associée à un logger), en fonction de la mesure de voisinage étendu. Cette figure nous apporte plusieurs informations : tout d'abord, on peut voir que selon la configuration du peloton, il est possible de communiquer dans une même époque avec un nombre de nœuds très variable, dont l'étendue va de moins de 10 à plus de 80. Ceci est un intervalle considérable. Ensuite, le nombre de voisins fiables est faible en comparaison des voisins "atteignables", et le voisinage fiable tend à décroître dès lors que le voisinage étendu dépasse 30. Plusieurs facteurs, comme le masquage, l'adaptation de puissance d'émission, les collisions et la saturation des nœuds peuvent conjointement expliquer ce phénomène.

En effet, la concentration de corps humains autour d'un nœud sont autant d'obstacles au cheminement de l'information. La densité augmente également la probabilité de collisions, et en dépit de la réduction de puissance le voisinage étendu peut être très élevé. Enfin, lorsqu'un nœud reçoit un nombre conséquent de messages, il peut arriver à saturation en raison d'un temps non négligeable passé hors de l'état de réception : réveil de la radio, traitement et stockage des paquets reçus. Il semble finalement raisonnable d'affirmer que les voisins les plus fiables sont ceux qui sont physiquement les plus proches.

7.5.5 Correlation entre ED et succès de transmission

Si, comme nous le présumons dans le paragraphe précédent, les voisins fiables sont physiquement les plus proches, il convient de vérifier cette hypothèse, qui semble néanmoins évidente. En admettant que les nœuds les plus proches sont ceux pour lesquels la mesure d'ED est la plus élevée, on peut alors étudier la corrélation entre la mesure d'ED et le nombre de paquets reçus pour chaque lien, à chaque époque.

Une méthode simple consiste à calculer le coefficient de corrélation de Pearson r_{vj} entre les vecteurs p_{vj} (nombre de paquets de j reçus par v à chaque époque) et w_{vj} (mesure d'ED moyenne des paquets du nœud j reçus par v à chaque époque). r_{vj} est donné par :

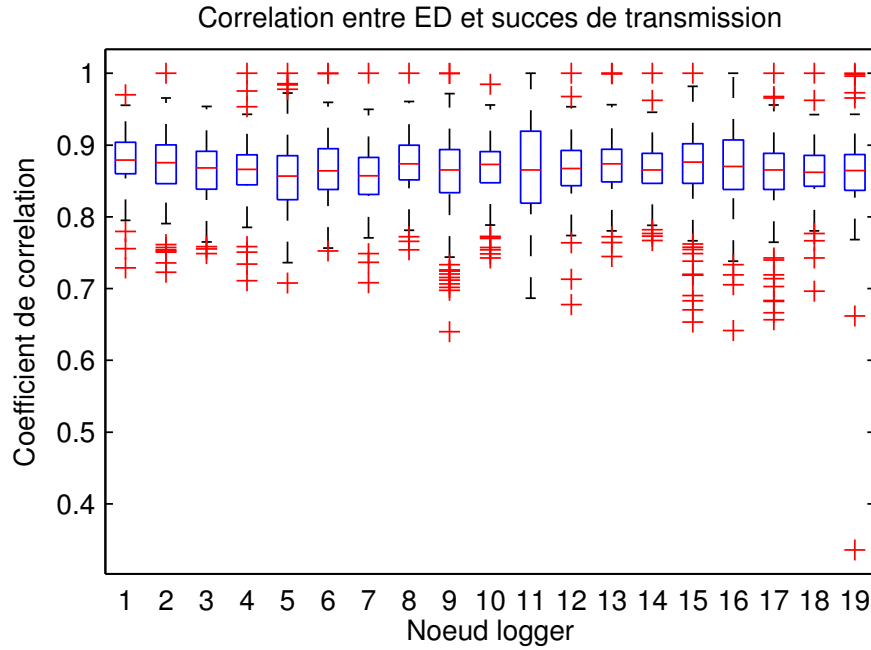


Figure 7.8 – Correlation entre la mesure d’ED et le nombre de messages reçus par époque.

$$\forall v, j \in V,$$

$$r_{vj} = \frac{\sum_{k=1}^K (p_{vj}(k) - \bar{p}_{vj})(w_{vj}(k) - \bar{w}_{vj})}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (p_{vj}(k) - \bar{p}_{vj})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^K (w_{vj}(k) - \bar{w}_{vj})^2}}$$

Compte tenu des données collectées, seuls les coefficients de corrélation des liens impliquant des nœuds loggers sont significatifs, et leur répartition est représentée sur la figure 7.8, avec la même représentation de diagrammes en boîte développée dans la section 7.5.2. Nous vérifions ici que le succès de transmission est comme attendu, très fortement corrélé avec la mesure d’ED, en dépit de nombreux facteurs pouvant rendre l’ED instable.

7.5.6 Stabilité du voisinage

La stabilité du voisinage est également une mesure intéressante, qui illustre la dynamique du réseau, et donc une information globale sur la manière dont certains nœuds peuvent apparaître ou disparaître d’un voisinage donné. Le voisinage est ici défini comme le *voisinage proche*, tel que calculé par l’algorithme implémenté. La métrique estimant la stabilité est définie comme suit : soit $S_v(k)$ l’ensemble des voisins du nœud v à l’époque k , et $S_v(k + \Delta_k)$ l’ensemble des voisins à l’époque $k + \Delta_k$. La mesure de stabilité $M_v(k)$ est alors la proportion des nœuds contenus dans $S(k)$ qui sont toujours

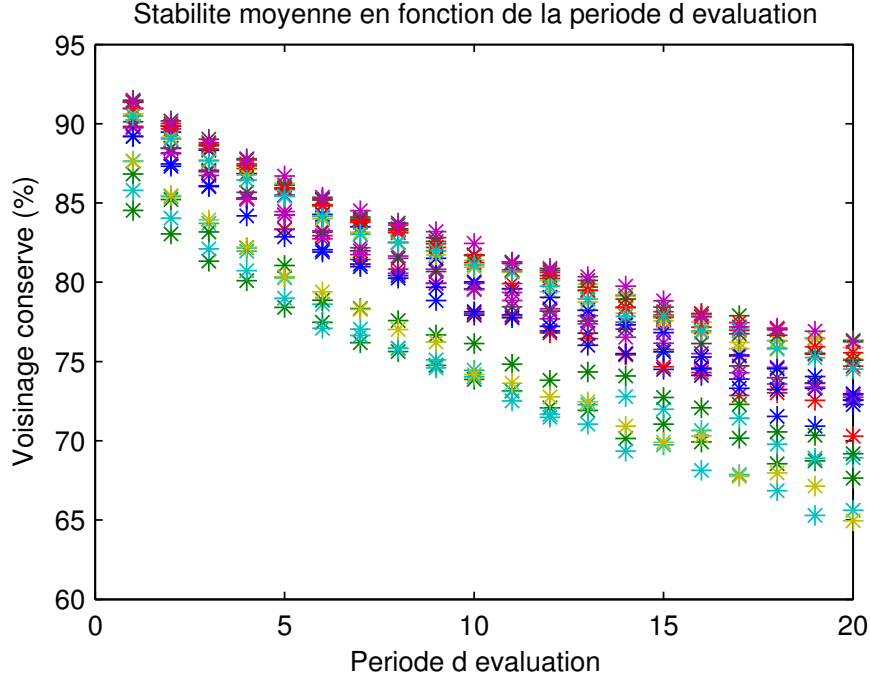


Figure 7.9 – Stabilité du voisinage des nœuds loggers en fonction de la période d'évaluation Δ_k , avec $1 \leq \Delta_k \leq 20$ s. Chaque couleur représente la mesure pour 1 nœud logger.

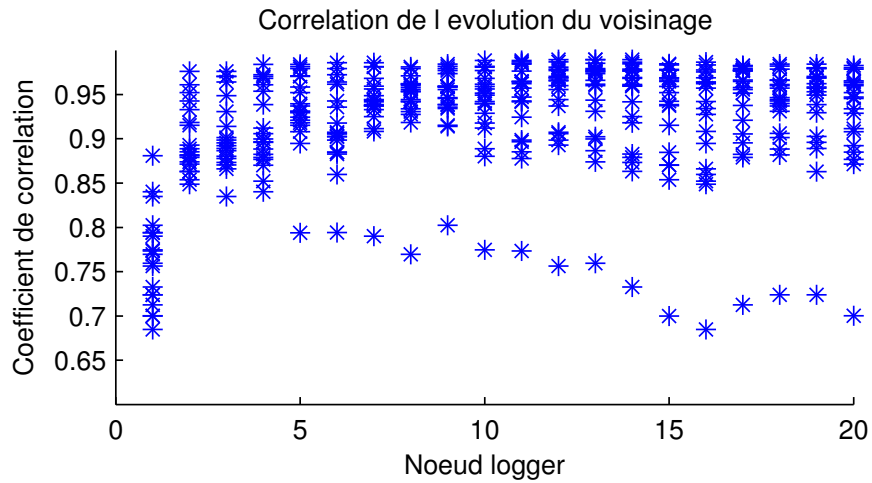
présents dans $S_v(k + \Delta_k)$, c'est-à-dire:

$$M_v(k) = \frac{\text{card}(S_v(k) \cap S_v(k + \Delta_k))}{\text{card}(S_v(k))}$$

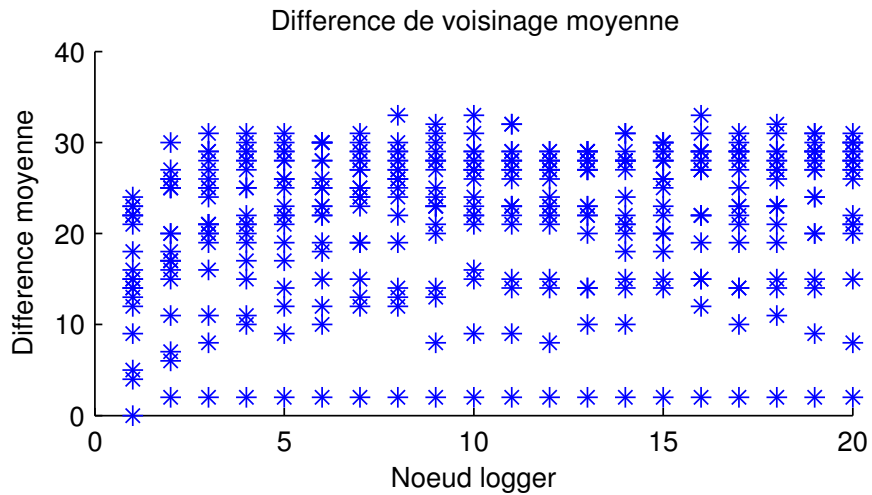
La figure 7.9 représente la mesure de stabilité moyenne pour chaque logger sur toute la durée enregistrée, en fonction d'une période d'évaluation Δ_k telle que $1 \leq \Delta_k \leq 20$ s. Cette mesure montre une décroissance globale à mesure que Δ_k augmente, montrant que certains liens ont une faible probabilité de rester présents après Δ_k , mais une large majorité (plus de 2/3) du voisinage reste présent même après $\Delta_k = 20$ s. Ceci tend à montrer que les positions relatives à l'intérieur du peloton évoluent de façon relativement lente, et l'on peut supposer que les liens éphémères sont ceux avec les nœuds en bordure du voisinage.

L'évaluation de la stabilité peut être utile pour définir par exemple une période raisonnable d'évaluation des groupes, pouvant autoriser des périodes d'inactivité du réseau. Si l'on décide par exemple de rafraîchir l'information toutes les 5 secondes, en conservant 1 seconde pour l'estimation des groupes, il est possible d'obtenir un gain considérable en énergie, en maintenant les nœuds en veille 80% du temps.

7.5.7 Corrélation de l'évolution du voisinage



(a) Corrélation de l'évolution du nombre de voisins au cours du temps.



(b) Différence moyenne du voisinage entre les différents nœuds loggers.

Figure 7.10 – Résultats sur l'évolution de la taille du voisinage entre les nœuds loggers : corrélation et différence moyenne.

Comme nous l'avons observé précédemment, les différentes mesures effectuées sur les données collectées par les nœuds loggers présentent de fortes similarités, pouvant être considérées comme des informations applicables à l'ensemble du réseau. Nous souhaitons maintenant évaluer si la forme globale du peloton (ou son étendue) a un effet similaire sur l'ensemble des voisinages des nœuds. Une méthode simple pour estimer les similarités entre l'évolution de la taille des voisinages est encore la mesure de corrélation. Le voisinage $S_v(k)$ est défini par l'ensemble de *voisins proches* du nœud v à chaque époque k , $n_v(k) = \text{card}(S_v(k))$ étant la taille de ce voisinage. On propose d'appliquer le coefficient de corrélation de Pearson m_{vj} pour chaque couple de loggers

v et j , défini par:

$$m_{vj} = \frac{\sum_{k=1}^K (n_v(k) - \bar{n}_v)(n_j(k) - \bar{n}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (n_v(k) - \bar{n}_v)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^K (n_j(k) - \bar{n}_j)^2}}$$

On définit également la différence sur la taille du voisinage entre les nœuds v et j à chaque époque k : $s_{vj}(k) = n_v(k) - n_j(k)$.

La figure 7.10 représente deux résultats intéressants. Sur la figure 7.10a sont représentés les coefficients de corrélation entre chaque couple de nœuds loggers. Dans tous les cas sauf un, la corrélation sur la taille du voisinage dans le temps est supérieure à 0.8. On peut voir que le nœud 1 a un comportement assez différent des autres; il est possible que ce nœud soit situé à l'une ou l'autre extrémité du peloton, à des endroits où l'on observe une topologie beaucoup plus stable, et relativement peu dense. La figure 7.10b, nous présentons la différence moyenne entre la taille du voisinage des loggers à chaque époque. Confrontée à la mesure de corrélation précédente, ceci nous permet de remarquer le fait qu'en dépit de voisinages assez différents dans l'absolu selon les nœuds considérés, la manière dont ceux-ci évoluent au cours du temps est très similaire, pour les nœuds situés bien à l'intérieur du peloton.

7.5.8 Connexion avec les puits

Après avoir analysé un certain nombre d'aspects, comme nous l'avons fait, des particularités du graphe dynamique au sein du peloton, il est intéressant caractériser l'évacuation des données vers les puits. Pour des raisons techniques, alors que les nœuds ont enregistré uniquement la première demi-heure de la course, les puits se trouvaient à proximité du réseau cycliste durant les deux dernières heures, correspondant à la durée de retransmission en direct. Les trames série transmises par les puits, enregistrées au niveau du poste central, n'ont donc pas de correspondance avec les données stockées par les nœuds. Il reste néanmoins possible de caractériser dans une certaine mesure la connectivité entre le réseau cycliste et les trois puits mobiles.

Outre les vecteurs de constitution des groupes, nous avons enregistré l'ensemble des identifiants entendus par les puits durant chaque époque (dans la limite de 30), ainsi que la mesure d'ED associée. Ces informations sont représentées sur la figure 7.11, où nous donnons les histogrammes du voisinage de chaque puits à chaque époque, et de la mesure d'ED (toutes sources confondues). Les barres verticales rouges sont les valeurs moyennes de ces paramètres. On peut remarquer, pour la moto de tête de course, un voisinage majoritaire de 4 voisins, correspondant aux 4 échappés. Toutefois, la mobilité et l'étalement de ce groupe font que la connexion avec les 4 membres n'est pas toujours possible, ceux-ci pouvant être amenés à se dissocier momentanément.

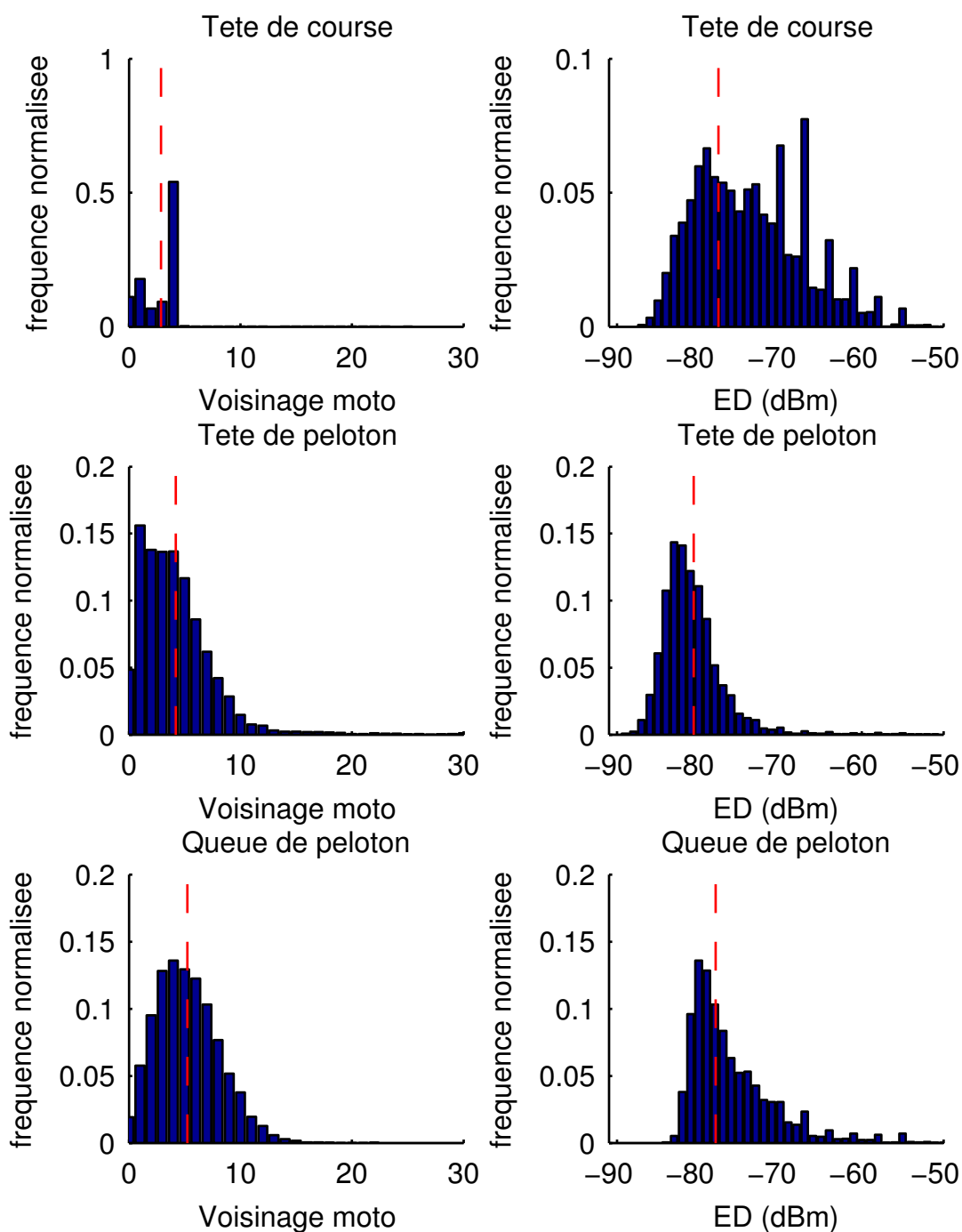


Figure 7.11 – Distribution empirique du voisinage des motos durant la durée d'enregistrement, mesure d'ED associée. Les barres verticales rouges représentent les valeurs moyennes.

L'étalement plus important des valeurs d'ED collectées sur ce puits illustre également une mobilité relative plus grande entre les nœuds et le puits, ce petit groupe présentant un plus grand degré de liberté.

Au niveau des puits encadrant le peloton, on peut observer que malgré la densité du groupe, seuls 5 nœuds sont en moyenne en contact avec le puits, et il est très rare que ce nombre soit supérieur à 10. Ceci est un effet de la forme du peloton, qui présente une forme de pointe aux deux extrémités, due à la nécessité d'aérodynamisme de la formation. Ainsi, à proximité des puits, on observe deux zones beaucoup moins denses, allant jusqu'à former une traîne de plusieurs cyclistes en file indienne. Compte tenu de cette forme, les zones plus denses sont donc très rarement accessibles par les motos. On peut remarquer également un niveau de signal à ces endroits relativement élevé, autour de -80 dBm, dont les variations autour de la valeur moyenne sont restreintes.

Ces deux résultats sont intéressants, si l'on se place du point de vue d'une collecte d'informations plus "fines", allant au-delà de simples identités de groupes. Si l'on souhaite, au-delà de cette application "gros grain", connaître de manière plus précise les voisinages individuels ou remonter des informations de distances relatives, il est indispensable de prendre en compte ce phénomène "d'entonnoir"; en effet, un nombre faible de nœuds en contact avec les puits risque d'entraîner une importante congestion du trafic aux extrémités, qu'il conviendra de réguler. En revanche, on peut compter sur des niveaux de canaux relativement stables et élevés avec les puits.

7.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré qu'il est possible d'adapter nos algorithmes de détection de groupes à l'échelle d'un peloton complet de cyclistes équipés de capteurs sans fils. L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre sont une première caractérisation d'un tel réseau. Un effort a été réalisé visant à extraire des informations synthétiques des données collectées, qui nous permettent de mieux comprendre les mécanismes de mobilité et leur impact sur les communications. Ces résultats statistiques sont utiles dès lors que l'on souhaite réaliser des modèles de mobilité réalistes, pouvant être utilisés en simulation. Nous détaillons le travail entamé sur la mobilité dans les perspectives générales, à la fin de cette thèse.

La similarité des résultats, ainsi que la grande couverture du réseau obtenus pour un sous-ensemble de nœuds enregistrant les événements se produisant dans leur environnement montre que les comportements observés sont généralisables à l'ensemble du réseau. Nous avons pu estimer le temps de convergence de l'algorithme MGMC, le diamètre et la taille des groupes, la stabilité et la fiabilité des voisinages et des communications.

Une fois cette première caractérisation effectuée, on peut imaginer plusieurs améliorations de l'algorithme, notamment ses réglages, par exemple une meilleure adaptation de la puissance d'émission, ou la mise en place de périodes de veille et de réveil, dans un souci d'économie d'énergie.

Si l'on cherche à mettre en place des méthodes de localisation plus précises, en récupérant par exemple un positionnement relatif des nœuds par rapport à leurs voisins, un réseau complexe et dense comme celui-ci associé à la contrainte "temps réel", pose deux problèmes : celui du positionnement distribué, qui nécessite de nombreux échanges de messages, joint à celui de l'évacuation des informations, pour lequel se pose à présent la question de l'acheminement de messages individuels vers les puits.

Si l'algorithme MGMC permet un premier niveau de connaissance par l'identification dynamique des membres d'un même groupe, qui est satisfaisante dans un premier temps pour des petites formations, il est évident que la considération du peloton complet comme un seul bloc apporte peu d'informations, et qu'une granularité plus fine dans l'estimation de positionnement doit être apportée.

8 Conclusion et perspectives

Nous avons abordé, dans cette thèse, la conception de plate-formes de capteurs sans fils, dans le but d'une collecte d'informations autour du corps humain en situation de mobilité. Guidés par des contraintes applicatives originales, à savoir le suivi d'événement en direct et l'apport de connaissances puisées au coeur de celui-ci, nous nous sommes attachés à donner des éléments de réponses répondant à ces contraintes, qui constituent un champ applicatif particulier des BAN. Deux aspects ont été développés, qui font l'objet de deux parties distinctes. Nous avons démarré par une approche individuelle, dans laquelle on cherche à extraire et centraliser des informations issues d'un ensemble de capteurs situés sur une personne, ce qui se rapproche de la recherche liée aux réseaux BAN. Nous avons ensuite développé une approche plus globale du suivi de l'événement, dans lequel un réseau multi-BAN s'apparente à un MANET au sein duquel les nœuds participent de manière distribuée à la construction d'une information générale du réseau. Dans un souci de validation pratique, chacune des deux approches a conduit à des implémentations dans les conditions réelles des scénarios applicatifs désirés.

L'étude de la littérature menée dans le chapitre 2 vise à comprendre les différentes raisons qui font des BAN un domaine de recherche à part entière, s'inscrivant dans le domaine plus vaste des réseaux de capteurs sans fils. Un aspect très important des BAN concerne la propagation au sein du réseau, qui compte tenu de la mobilité et du masquage dû aux propriétés des tissus humains présente un profil complexe, spatialement et temporellement corrélé, pouvant altérer considérablement la qualité des échanges de messages. Nous faisons également émerger dans ce chapitre les tendances concernant les protocoles MAC de centralisation des informations au niveau individuel, à travers notamment des propositions récentes visant la résolution des problèmes liés au masquage. Si de très nombreux travaux sur les BAN portent sur des applications médicales, nous montrons que le sport constitue encore un domaine marginal de la recherche portant sur les BAN, bien que de nombreux systèmes

connectés soient d'ores et déjà commercialisés.

Les réalisations de réseaux BAN, dans le contexte applicatif qui nous intéresse, étant peu étudiées, nous proposons dans le chapitre 3 la réalisation d'un premier prototype permettant la collecte d'un ensemble d'informations issues de 3 capteurs embarqués sur un marathonien. Nous réalisons ici l'ensemble du processus d'acquisition de données et de communication, assurant la transmission d'informations en direct vers un puits mobile à proximité. Outre une validation de la chaîne de transmission complète, et l'intégration du système déployé, constitué de nœuds HiKoB, au sein de l'infrastructure globale de collecte et de retransmission d'Euromedia, nous récupérons une première base de données expérimentales, donnant lieu à une première caractérisation des liens *off-body*. Plusieurs informations extraites de ces données montrent notamment l'influence de la taille des paquets sur la qualité des communications, la dynamique des canaux, ainsi que la qualité de la métrique fournie par la radio pour l'estimation des canaux.

La plate-forme de capteurs dont nous disposons nous a permis d'étudier ensuite la collecte individuelle de données, avec pour objectif l'estimation des canaux et des performances pouvant être obtenues avec des capteurs industriels. Si plusieurs études montrent l'avantage de l'utilisation de tels capteurs quant à la liberté de mouvement, l'originalité de la plate-forme que nous développons dans le chapitre 4 tient au fait qu'elle réalise l'échantillonnage, dans un temps très court, de l'ensemble des canaux d'un BAN, c'est-à-dire l'estimation des puissances reçues sur le maillage complet. Les données collectées permettent d'apporter plusieurs éléments, concernant à la fois la confrontation des données expérimentales confrontées aux modèles existants, mais aussi sur les performances pouvant être obtenues par des protocoles coopératifs visant une optimisation de la puissance rayonnée. Ce dernier aspect sur la puissance est important, car il offre la possibilité de meilleures performances de communication, dès lors qu'il y a cohabitation de plusieurs BAN dans un même espace.

Nous nous sommes attachés dans la seconde partie de cette thèse à une approche différente et complémentaire du BAN sportif, qui concerne le suivi d'un événement auquel un ensemble de nœuds en mouvement formant un réseau multi-BAN participent à la construction de l'information générale. Avec pour objectif à terme la localisation de l'ensemble des nœuds d'un peloton cycliste, nous nous sommes intéressés, dans le chapitre 5, aux divers aspects que peut revêtir un tel scénario en termes de réseau. Si celui-ci peut s'apparenter à un MANET, de nombreuses singularités, notamment sur la mobilité et le masquage, faits importants des réseaux BAN, en font un cas particulier pour lequel peu d'a priori et aucun modèle n'existent. Nous nous sommes penchés sur un ensemble de thématiques, comme la localisation distribuée et les algorithmes de consensus, ainsi que les expérimentations sportives à large échelle, ce qui nous a permis d'élaborer les propositions développées dans les

chapitres suivants.

Nous avons proposé, dans le chapitre 6, un ensemble d’algorithmes visant la détection des groupes pouvant apparaître dans un réseau de capteurs mobiles, selon un critère de distance. Ces algorithmes simples, non hiérarchisés et de nature broadcast, sont applicables à tout type de réseau nécessitant de telles estimations. Basés sur le principe du consensus distribué, nous démontrons la convergence en temps fini de ces algorithmes, en dérivant des bornes théoriques sur la convergence. La validation est encore une fois assurée par la mise en œuvre d’une plate-forme prévue pour le suivi d’un groupe limité de cyclistes, avec l’intégration des données aux flux vidéo télévisuel.

Cette réalisation préliminaire a conduit à la réalisation d’une expérimentation à grande échelle, c’est-à-dire l’ensemble des coureurs d’une course cycliste internationale, dans le chapitre 7. Nous y présentons plusieurs améliorations de nos algorithmes de détection de groupes mobiles, visant à réduire les variations et les effets négatifs induits par la mobilité, la densité et l’étendue du réseau. L’expérimentation menée sur la course Paris-Tours nous a permis de collecter de très nombreuses informations locales, grâce auxquelles nous avons pu interpréter le comportement du réseau global. Ces travaux sont à notre connaissance les premiers visant à caractériser un réseau cycliste complet, et les résultats que nous fournissons ouvrent de nombreuses perspectives.

Perspectives

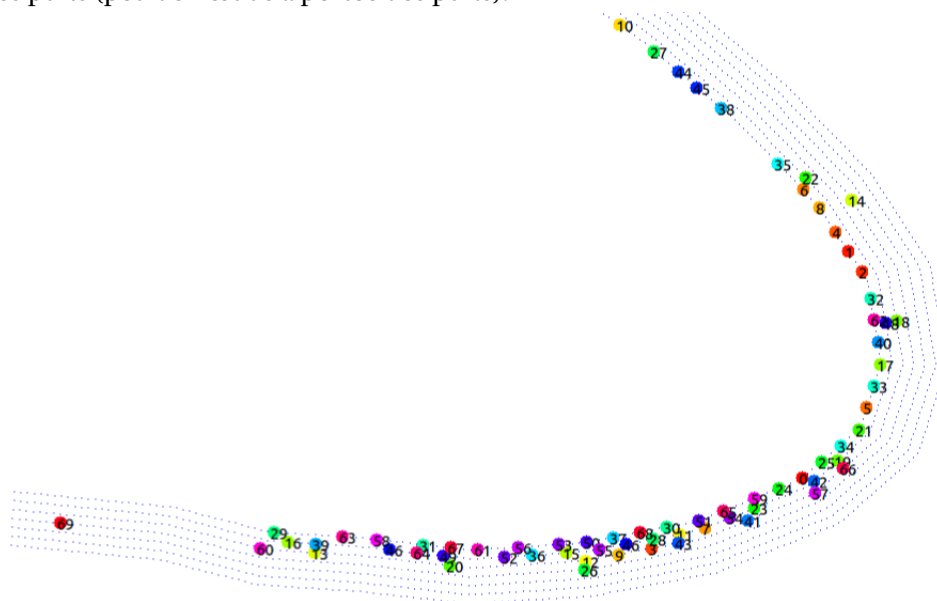
Outre l’exploitation de la plate-forme mise au point pour le chapitre 4 dans le projet CORMORAN, visant la navigation de groupes multi-BAN, que nous évoquons à la fin du chapitre 4, la finalité du projet de suivi de groupes cyclistes dégage de nombreuses perspectives. Si nous apportons un premier niveau de réponse dans cette thèse, en collectant les identités proches, via un protocole d’agrégation multi-sauts, la suite du projet fait émerger plusieurs champs de recherche intéressants.

Mobilité du réseau cycliste

Les mesures que nous avons pu collecter lors de la course Paris-Tours 2013, synthétisées dans le chapitre 7, nous ont donné une première opportunité de caractériser le comportement des communications en situation de mobilité du réseau cycliste complet. Cette étude uniquement basée sur les communications, permet de déduire a posteriori une estimation de la mobilité physique des nœuds autour d’une vingtaine de loggers au cours du temps.



(a) Comportement de groupe dense (vitesse similaire), mobilité interne faible. La forme aérodynamique du peloton est une caractéristique importante du point de vue de la communication avec les puits (peu de nœuds à portée des puits).



(b) Mobilité dans un virage suivant une courbure importante. Nous mettons en évidence l'étirement du peloton, qui suit la corde du virage.

Figure 8.1 – Illustrations du modèle de mobilité en cours de développement, avec ici 70 nœuds . La route est discrétisée ($N = 7$ voies, distance fixe $d_v = 1.70$ m entre les nœuds).

Pour aller plus loin dans le développement d'algorithmes, pour la localisation ou l'acheminement des données de positionnement vers les puits, il devient nécessaire de construire des environnements de simulation réalistes, car les essais expérimentaux dans de telles conditions sont compliqués à mettre en œuvre . Afin d'obtenir cet environnement, nous devons être capables de proposer un modèle de mobilité adapté, représentant de manière suffisamment juste l'évolution de la position de tous les nœuds au cours du temps. Celui-ci, associé à un modèle de propagation, peut alors être

intégré dans un simulateur de réseau, tel que le simulateur à événements WSN_{et} [wsn, 2014].

Nous nous intéressons particulièrement ici à la réalisation d'un modèle de mobilité adapté à une course cycliste. Tout d'abord, si l'on se réfère à la littérature en la matière, [Camp et al., 2002, Bai and Helmy, 2004], on peut constater que le modèle particulier que nous souhaitons construire partage des caractéristiques de réseaux spatialement corrélés, tel que le modèle Reference Point Group Mobility (RPGM), pour lequel les nœuds évoluent en groupe, suivant un point de référence. Toutefois, un tel modèle ne traite pas certains problèmes liés à la réalité du peloton. En effet, il ne prend pas en compte les dimensions des nœuds, ce qui peut entraîner des positions identiques de plusieurs nœuds (physiquement impossible) ni l'encadrement du peloton par une route, dont la courbure ou l'élévation ont une forte influence sur l'agencement des coureurs. Ceci peut rapprocher notre réseau cycliste d'un réseau véhiculaire, toutefois les modèles développés pour ce type de réseaux, tel Freeway [Fiore, 2006], répondent à des règles strictes conformes à la mobilité des véhicules motorisés (2 à 3 voies de circulation, règles de dépassement, modélisation de la poursuite ...).

Notre scénario original requiert donc un modèle particulier, pouvant prendre en compte un ensemble de paramètres, liés à la route, et à des scénarios de mobilité classiques (échappées, poursuite ...). Un étudiant, Florin Avram, à la suite d'Ahmed Sabet, travaille actuellement sur un modèle combinant la corrélation spatiale et la contrainte de la route, illustré par les figures 8.1a et 8.1b. La route correspond ici au tracé de la course Paris-Tours acquis par les motos, et la vitesse du groupe est celle collectée par les motos encadrant le peloton. La route est représentée par un ensemble de *voies* sur lesquelles sont placés les nœuds, en prenant soin d'éviter les chevauchements. Nous cherchons à modéliser des comportements classiques, tel que l'étirement du peloton dans les courbes importantes, illustré par la figure 8.1b, la génération d'un groupe d'échappés, ou la mobilité interne du peloton. L'ensemble des positions est ici réévalué chaque seconde.

L'intégration prochaine de ce modèle à un simulateur de réseaux sans fils, tel que WSN_{et}, constitue une prochaine étape de la construction de l'environnement de simulation.

Suite du projet

Le projet général dans lequel s'inscrit cette thèse, démarrée fin 2011, a depuis été appelé à s'étendre sur plusieurs aspects, car le projet SMACS (pour SMart And Connected Sensors) a été retenu lors du 16ème appel à projets FUI [fui, 2013]. Ce projet a pour but de faire suite aux travaux présentés dans cette thèse, en travaillant davantage sur la réalisation d'algorithmes de localisation distribués adaptés à des contextes de mobilité,

ceci dans le but de connaître de façon précise le positionnement relatif des coureurs.

Un autre aspect dont le développement est également envisagé, est celui de la fiabilisation et de l'optimisation des transmissions. En effet, jusqu'alors le problème des liens peu fiables et des informations erronées n'a pas été particulièrement abordé; nous nous sommes contentés de détecter les paquets erronés, et de ne pas les prendre en compte. Si dans un environnement très dense et très mobile peuvent se produire de nombreuses collisions, le masquage peut également entraîner des réceptions de paquets erronés. Un travail sur des méthodes de codage canal efficaces, ou de codage de réseau, est à présent nécessaire, l'ajout de redondance permettant de corriger ces paquets erronés. De plus, les problèmes liés à l'acheminement de nombreuses données conduisent, comme nous l'avons vu, à un engorgement du transit au niveau des nœuds situés à proximité des puits. Un protocole agrégeant par exemple des données multi-sauts peut conduire à des paquets de taille conséquente, ce qui augmente à la fois l'énergie consommée, l'occupation du canal et la probabilité d'erreurs, il peut être intéressant dans ce cas d'optimiser la taille des paquets d'informations, notamment par des méthodes de codage de source.

Enfin, ce type de scénario original mettant en jeu des phénomènes très particuliers, les protocoles permettant d'affiner le niveau des informations collectées, les algorithmes de localisation distribués, associés à la forte contrainte du temps réel soulèvent, au-delà des objectifs applicatifs, des problématiques de recherche intéressantes.

A Annexes

A.1 Preuve du théorème 6.2.1

Avant d'atteindre la convergence, on considère que le réseau connaît une succession d'états S_i , on note t_i l'instant correspondant (en nombre de coups d'horloge réseau). t_i est une variable aléatoire représentant l'instant auquel l'état du réseau passe de S_{i-1} à S_i . S est tel que :

- S_0 est l'état au démarrage ($t_0 = 0$).
- S_1 est l'état pour lequel chaque nœud a au moins reçu une fois un vecteur contenant tous ses voisins à un saut, t_1 est le premier instant auquel cette situation est vérifiée.
- ...
- L'état S_i est atteint dès lors que chaque nœud a reçu au moins une fois un vecteur contenant l'ensemble des nœuds situés à une distance i .

Il apparaît clairement que S_{Δ_G} est l'état pour lequel la convergence est assurée, car dans ce cas chaque nœud a reçu un vecteur contenant l'ensemble des nœuds présents.

L'état S_1 est atteint dès lors que chaque nœud a reçu le vecteur B^v contenant ses voisins directs v , soit lorsque *tous* les nœuds ont émis leur paquet au moins une fois (dans le cas de liens sans erreur). Ce type de problème se rapproche de celui du *collectionneur de vignettes* [Motwani and Raghavan, 1995], grâce auquel il est possible d'obtenir l'espérance de t_i . Le problème du collectionneur de vignettes indique, étant donnée une variable aléatoire pouvant prendre N valeurs possibles selon une distribution uniforme, l'espérance du nombre de tirages nécessaires pour obtenir *chacune des N valeurs*.

La preuve est donnée que cette espérance est Nh_N , avec $h_N = (1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{N})$. On considère que l'état S_1 survient lorsque chaque nœud a émis son paquet au moins une fois. Compte tenu de l'hypothèse selon laquelle les nœuds émetteurs sont choisis selon une distribution uniforme, notre problème est tout à fait assimilable à un collectionneur de vignettes, l'espérance de t_1 est alors:

$$\mathbb{E}(t_1) = Nh_N = N(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{N})$$

L'obtention de l'état S_2 survient ensuite lorsque chaque nœud a de nouveau émis son vecteur B , chaque nœud obtenant alors l'information complète de ses voisins à deux sauts. Un nombre additionnel de coups d'horloge $t_2 - t_1$ est nécessaire pour atteindre S_2 , dont l'espérance est

$$\mathbb{E}(t_2 - t_1 | S_1) = Nh_N$$

.

τ étant défini comme le temps de convergence de l'algorithme, on a:

$$\tau = t_{\Delta_G} = t_{\Delta_G} - t_{\Delta_G-1} + t_{\Delta_G-1} - t_{\Delta_G-2} + \dots t_1 - t_0$$

On peut alors écrire

$$\mathbb{E}(\tau) \leq \sum_{i=0}^{\Delta_G-1} \mathbb{E}(t_{i+1} - t_i | S_i) = \sum_{i=0}^{\Delta_G-1} Nh_N = N\Delta_G h_N$$

En utilisant l'inégalité $h_n \leq 1 + \log(n)$, on obtient le résultat donné par le théorème 6.2.1:

$$\mathbb{E}[\tau] < N\Delta_G(1 + \log(N))$$

A.2 Preuve du théorème 6.2.2

Soit $A_k^v(t)$ l'événement tel que, au cours de l'état S_k , le nœud v n'a pas émis son paquet après t itérations. La probabilité de cet événement est $\mathbb{P}(A_k^v(t)) = \left(\frac{N-1}{N}\right)^t$: le nœud v n'a pas émis son paquet après t coups d'horloge suivant le début de S_k . Si nous avons $t_{k+1} - t_k \geq t$, ceci implique que l'événement $A_k^v(t)$ a eu lieu pour au moins un nœud v , donc en utilisant l'inégalité de Boole :

$$\mathbb{P}(t_{k+1} - t_k \geq t) \leq \mathbb{P}\left(\bigcup_{v \in G} A_k^v(t)\right) \leq \sum_{v \in G} \mathbb{P}(A_k^v(t)) = \sum_{v \in G} (1 - 1/N)^t$$

En utilisant le fait que $1 - y \leq \exp(-y)$ for $0 \leq y \leq 1$, on obtient:

$$\mathbb{P}(t_{k+1} - t_k \geq t) \leq N \exp(-t/N)$$

Pour tout $\epsilon \geq 0$, en choisissant $t_\epsilon = N \log(N) + N \log\left(\frac{\Delta_G}{\epsilon}\right)$ on obtient :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}\left(t_{k+1} - t_k \geq N \log(N) + N \log\left(\frac{\Delta_G}{\epsilon}\right)\right) &\leq \\ N * \exp\left(-\left(N \log(N) + N \log\left(\frac{\Delta_G}{\epsilon}\right)\right)/N\right) &= \\ N * \exp(-\log(N) - \log(\frac{\Delta_G}{\epsilon})) &= \frac{\epsilon}{\Delta_G} \end{aligned}$$

En utilisant à nouveau l'inégalité de Boole, la probabilité qu'au moins un état dure davantage que t_ϵ est telle que :

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{k=0}^{\Delta_G-1} (t_{k+1} - t_k \geq t_\epsilon)\right) \leq \sum_{k=0}^{\Delta_G-1} \mathbb{P}(t_{k+1} - t_k \geq t_\epsilon) \leq \Delta_G \cdot \frac{\epsilon}{\Delta_G} = \epsilon$$

Si chaque état présente une durée inférieure t_ϵ , ceci implique que l'algorithme convergera avec une durée inférieure à $\Delta_G \cdot t_\epsilon$, on obtient le résultat :

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(t_{\Delta_G} < \Delta_G \cdot t_\epsilon) &\geq \mathbb{P}\left(\bigcap_{k=0}^{\Delta_G-1} (t_{k+1} - t_k < t_\epsilon)\right) = \\ 1 - \mathbb{P}\left(\bigcup_{k=0}^{\Delta_G-1} (t_{k+1} - t_k \geq t_\epsilon)\right) &\geq 1 - \epsilon \end{aligned}$$

et donc le résultat du théorème 6.2.2:

$$\mathbb{P}\left(\tau < N \cdot \Delta_G \cdot \left(\log(N) + \log\left(\frac{\Delta_G}{\epsilon}\right)\right)\right) \geq 1 - \epsilon$$

Liste des abréviations

AFD *Average Fade Duration.*

AWGN bruit blanc additif gaussien, en anglais *Additive White Gaussian Noise.*

BAN réseau de capteurs sans fil autour du corps humain, en anglais *Body Area Network.*

CSMA accès multiple avec détection de porteuse, en anglais *Carrier Sense Multiple Access.*

CSMA/CA CSMA évitant les collisions, en anglais *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance.*

DTN réseau tolérant aux délais, en anglais *Delay Tolerant Network.*

ED Energy Detection.

FFT transformée de Fourier rapide, en anglais *Fast Fourier Transform.*

FSR jauges de contrainte, en anglais *Force Sensitive Resistance.*

GMC consensus sur les groupes de partenaires, en anglais *Group Mate Consensus.*

GTS *Guaranteed Time Slots.*

HBC communication au sein du corps humain, en anglais *Human Body Communication.*

LCR *Level Crossing Rate.*

LQI indicateur de qualité de lien, en anglais *Link Quality Indicator.*

MAC couche d'accès au médium, en anglais *Medium Access Control.*

MANET réseau ad-hoc mobile, en anglais *Mobile Ad-hoc Network.*

Liste des abréviations

MEMS microsystèmes électro-mécaniques, en anglais *Micro Electro-Mechanical Systems*.

MGMC consensus sur les groupes de partenaires mobiles, en anglais *Mobile Group Mate Consensus*.

PER taux d'erreur paquet, en anglais *Packet Error Rate*.

QoS Qualité de Service, en anglais *Quality of Service*.

RBM max-consensus broadcast aléatoire, en anglais *Random Broadcast Max*.

RCsF Réseau de Capteurs sans Fil.

RPGM Reference Point Group Mobility.

RSSI indicateur de puissance reçue, en anglais *Received Signal Strength Indicator*.

SGC consensus de groupe statique, en anglais *Static Group Consensus*.

TDMA accès multiple à répartition dans le temps, en anglais *Time Division Multiple Access*.

UWB bande ultra-large, en anglais *Ultra Wide Band*.

Bibliography

- [atm, 2012] (2012). AT86RF231. <http://www.atmel.com/devices/AT86RF231.aspx>. (Cité en pages 25, 26, 28 et 46.)
- [fui, 2013] (2013). 16eme appel a projets fui. <http://competitivite.gouv.fr/le-16e-appel-a-projets-fui/les-resultats-du-16e-appel-a-projets-fui-972.html>. (Cité en page 147.)
- [par, 2013] (2013). Course internationale Paris-Tours 2013. <http://www.letour.fr/paris-tours/2013/fr/>. (Cité en pages 118 et 126.)
- [dau, 2013] (2013). Critérium du Dauphiné 2013. <http://www.letour.fr/criterium-du-dauphine/2013/fr/>. (Cité en page 116.)
- [ope, 2014] (2014). <http://openocd.sourceforge.net/>. (Cité en page 28.)
- [arm, 2014] (2014). <https://launchpad.net/gcc-arm-embedded>. (Cité en page 28.)
- [fre, 2014] (2014). <http://www.freertos.org/>. (Cité en page 28.)
- [ant, 2014] (2014). Ant wireless. <http://www.thisisant.com/>. (Cité en page 88.)
- [eur, 2014] (2014). Euro media france. www.euromedia-france.com. (Cité en page 21.)
- [hik, 2014a] (2014a). HiKoB FOX sensor. http://www.hikob.com/assets/uploads/2014/07/HIKOB_FOX_ProductSheet_FR.pdf. (Cité en pages 23, 24 et 32.)
- [hik, 2014b] (2014b). HiKoB LION router. http://www.hikob.com/assets/uploads/2014/07/HIKOB_AZURE_LION_ProductSheet_FR.pdf. (Cité en pages 23 et 25.)
- [hik, 2014c] (2014c). HiKoB SA. www.hikob.com. (Cité en page 21.)
- [l3g, 2014] (2014). L3G4200D. http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC1288/PF250373. (Cité en page 25.)
- [lsm, 2014] (2014). LSM303DLHC. http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC1449/PF251940/. (Cité en pages 24 et 25.)

Bibliography

- [mar, 2014] (2014). Marathon de paris. <http://www.schneiderelectricparismarathon.com/>. (Cité en page 30.)
- [cor, 2014] (2014). Projet ANR Cormoran. [http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-11-INFR-0010](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-11-INFR-0010). (Cité en pages 76 et 77.)
- [wsn, 2014] (2014). Simulateur de réseaux WSNet. <http://wsnet.gforge.inria.fr/>. (Cité en pages 76 et 147.)
- [stm, 2014a] (2014a). STM32F103RE. <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1031>. (Cité en page 24.)
- [stm, 2014b] (2014b). STM32L100. <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1295>. (Cité en page 25.)
- [ubl, 2014a] (2014a). UBLOX MAX6. [http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/MAX-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-10106\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/MAX-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-10106).pdf). (Cité en pages 25, 35 et 84.)
- [ubl, 2014b] (2014b). UBLOX MAX7. [http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/MAX-7_DataSheet_\(GPS.G7-HW-1201\).pdf](http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/MAX-7_DataSheet_(GPS.G7-HW-1201).pdf). (Cité en page 85.)
- [Adewumi et al., 2013] Adewumi, O., Djouani, K., and Kurien, A. (2013). Rssi based indoor and outdoor distance estimation for localization in wsn. In *Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1534–1539. (Cité en page 86.)
- [Akram et al., 2013] Akram, S., Javaid, N., Tauqir, A., Rao, A., and Mohammad, S. (2013). The-fame: Threshold based energy-efficient fatigue measurement for wireless body area sensor networks using multiple sinks. In *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2013 Eighth International Conference on*, pages 214–220. (Cité en page 20.)
- [Akyildiz et al., 2002] Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393 – 422. (Cité en pages 8 et 83.)
- [Amundson and Koutsoukos, 2009] Amundson, I. and Koutsoukos, X. (2009). A survey on localization for mobile wireless sensor networks. In Fuller, R. and Koutsoukos, X., editors, *Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments*, volume 5801 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 235–254. Springer Berlin Heidelberg. (Cité en page 85.)
- [Aysal et al., 2009] Aysal, T., Yildiz, M., Sarwate, A., and Scaglione, A. (2009). Broadcast gossip algorithms for consensus. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 57(7):2748–2761. (Cité en pages 87 et 97.)

- [Bai and Helmy, 2004] Bai, F. and Helmy, A. (2004). A survey of mobility models. *Wireless Adhoc Networks. University of Southern California, USA*, 206. (Cité en page 147.)
- [Benferhat et al., 2012] Benferhat, D., Guidec, F., and Quinton, P. (2012). Cardiac monitoring of marathon runners using disruption-tolerant wireless sensors. In Bravo, J., López-de Ipiña, D., and Moya, F., editors, *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence*, volume 7656 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 395–402. Springer Berlin Heidelberg. (Cité en pages 21 et 30.)
- [Benkic et al., 2008] Benkic, K., Malajner, M., Planinsic, P., and Cucej, Z. (2008). Using rssi value for distance estimation in wireless sensor networks based on zigbee. In *Systems, Signals and Image Processing, 2008. IWSSIP 2008. 15th International Conference on*, pages 303–306. (Cité en page 86.)
- [Blondel et al., 2008] Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., and Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008(10):P10008. (Cité en page 87.)
- [Boulis et al., 2012] Boulis, A., Smith, D., Miniutti, D., Libman, L., and Tselishchev, Y. (2012). Challenges in body area networks for healthcare: the mac. *Communications Magazine, IEEE*, 50(5):100–106. (Cité en page 19.)
- [Boyd et al., 2006] Boyd, S., Ghosh, A., Prabhakar, B., and Shah, D. (2006). Randomized gossip algorithms. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 52(6):2508–2530. (Cité en pages 87 et 97.)
- [Burin des Roziers et al., 2011] Burin des Roziers, C., Chelius, G., Ducrocq, T., Fleury, E., Fraboulet, A., Gallais, A., Mitton, N., Noël, T., and Vandaele, J. (2011). Using senslab as a first class scientific tool for large scale wireless sensor network experiments. In Domingo-Pascual, J., Manzoni, P., Palazzo, S., Pont, A., and Scoglio, C., editors, *NETWORKING 2011*, volume 6640 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 147–159. Springer Berlin Heidelberg. (Cité en page 23.)
- [Camp et al., 2002] Camp, T., Boleng, J., and Davies, V. (2002). A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5):483–502. (Cité en page 147.)
- [Chaganti et al., 2010] Chaganti, V., Smith, D., and Hanlen, L. (2010). Second-order statistics for many-link body area networks. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 9:322–325. (Cité en page 16.)
- [Chelius et al., 2011] Chelius, G., Braillon, C., Pasquier, M., Horvais, N., Gibollet, R., Espiau, B., and Coste, C. (2011). A wearable sensor network for gait analysis: A six-day experiment of running through the desert. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 16(5):878–883. (Cité en pages 20 et 23.)

Bibliography

- [Chen et al., 2011] Chen, M., Gonzalez, S., Vasilakos, A., Cao, H., and Leung, V. C. (2011). Body area networks: A survey. *Mob. Netw. Appl.*, 16(2):171–193. (Cité en pages 11, 12 et 17.)
- [Chohan and Fiorese, 2008] Chohan, N. and Fiorese, C. (2008). Cyclenet: Empirical analysis of 802.15. 4 in mobile scenarios. (Cité en pages 89 et 106.)
- [Comroe and Costello, 1984] Comroe, R. and Costello, D.J., J. (1984). Arq schemes for data transmission in mobile radio systems. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2(4):472–481. (Cité en page 43.)
- [Cortes, 2008] Cortes, J. (2008). Distributed algorithms for reaching consensus on general functions. *Automatica*, 44(3):726 – 737. (Cité en page 88.)
- [Cotton et al., 2009] Cotton, S., Conway, G., and Scanlon, W. (2009). A time-domain approach to the analysis and modeling of on-body propagation characteristics using synchronized measurements at 2.45 ghz. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 57(4):943–955. (Cité en page 15.)
- [Cotton and Scanlon, 2006] Cotton, S. and Scanlon, W. (2006). A statistical analysis of indoor multipath fading for a narrowband wireless body area network. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on*, pages 1–5. (Cité en page 14.)
- [Denis et al., 2014] Denis, B., Amiot, N., Uguen, B., Guizar, A., and Goursaud, C. (2014). Qualitative analysis of rssi behavior in cooperative wireless body area networks for mobility detection and navigation applications. *ICECS 2014*. (Cité en page 76.)
- [D’Errico and Ouvry, 2010] D’Errico, R. and Ouvry, L. (2010). A statistical model for on-body dynamic channels. *International Journal of Wireless Information Networks*, 17(3-4):92–104. (Cité en pages 15 et 61.)
- [Dong and Smith, 2014] Dong, J. and Smith, D. (2014). Joint relay selection and transmit power control for wireless body area networks coexistence. In *Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on*, pages 5676–5681. (Cité en pages 19, 61, 71 et 72.)
- [Eisenman et al., 2010] Eisenman, S. B., Miluzzo, E., Lane, N. D., Peterson, R. A., Ahn, G.-S., and Campbell, A. T. (2010). Bikenet: A mobile sensing system for cyclist experience mapping. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 6(1):6:1–6:39. (Cité en page 89.)
- [Ferrand, 2013] Ferrand, P. (2013). *Communications coopératives dans les réseaux autour du corps humain*. Theses, INSA de Lyon. (Cité en pages 52 et 58.)
- [Ferrand et al., 2011] Ferrand, P., Maman, M., Goursaud, C., Gorce, J.-M., and Ouvry, L. (2011). Performance evaluation of direct and cooperative transmissions in body area networks. *annals of telecommunications - annales des télécommunications*, 66(3-4):213–228. (Cité en page 43.)

- [Fiore, 2006] Fiore, M. (2006). Mobility models in inter-vehicle communications literature. *Politecnico di Torino*. (Cité en page 147.)
- [Fournel et al., 2007] Fournel, N., Fraboulet, A., Chelius, G., Fleury, E., Allard, B., and Brevet, O. (2007). Worldsens: From lab to sensor network application development and deployment. In *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '07*, pages 551–552, New York, NY, USA. ACM. (Cité en page 23.)
- [Fu et al., 2012] Fu, R., Ye, Y., and Pahlavan, K. (2012). Characteristic and modeling of human body motions for body area network applications. *International Journal of Wireless Information Networks*, 19(3):219–228. (Cité en pages 15, 55 et 61.)
- [Fu et al., 2011] Fu, R., Ye, Y., Yang, N., and Pahlavan, K. (2011). Doppler spread analysis of human motions for body area network applications. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, pages 2209–2213. (Cité en page 15.)
- [Gharghan et al., 2014] Gharghan, S. K., Nordin, R., and Ismail, M. (2014). A survey on energy efficient wireless sensor networks for bicycle performance monitoring application. *Journal of Sensors*, 2014. (Cité en page 88.)
- [Gorce et al., 2009] Gorce, J.-M., Goursaud, C., Villemaud, G., D’Errico, R., and Ouvry, L. (2009). Opportunistic relaying protocols for human monitoring in ban. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, pages 732–736. (Cité en page 43.)
- [Gouwanda and Senanayake, 2008] Gouwanda, D. and Senanayake, S. (2008). Emerging trends of body-mounted sensors in sports and human gait analysis. In Abu Osman, N., Ibrahim, E., Wan Abas, W., Abdul Rahman, H., and Ting, H.-N., editors, *4th Kuala Lumpur International Conference on Biomedical Engineering 2008*, volume 21 of *IFMBE Proceedings*, pages 715–718. Springer Berlin Heidelberg. (Cité en page 20.)
- [Hallberg et al., 2004] Hallberg, J., Svensson, S., Ostmark, A., Lindgren, P., Synnes, K., and Delsing, J. (2004). Enriched media-experience of sport events. In *Mobile Computing Systems and Applications, 2004. WMCSA 2004. Sixth IEEE Workshop on*, pages 2–9. (Cité en page 20.)
- [Hara et al., 2011] Hara, S., Anzai, D., Yanagihara, K., Takizawa, K., and Hamaguchi, K. (2011). A cooperative transmission scheme for real-time data gathering in a wireless body area network. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011 IEEE 22nd International Symposium on*, pages 2254–2258. (Cité en pages 18 et 70.)
- [Heurtefeux and Valois, 2012] Heurtefeux, K. and Valois, F. (2012). Is rssi a good choice for localization in wireless sensor network? In *Advanced Information Networking*

Bibliography

- and Applications (AINA)*, 2012 IEEE 26th International Conference on, pages 732–739. (Cité en page 86.)
- [Hofmann-Wellenhof et al., 1993] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (1993). Global positioning system. theory and practice. *Global Positioning System. Theory and practice.*, by Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.. Springer, Wien (Austria), 1993, 347 p., ISBN 3-211-82477-4, Price DM 79.00. ISBN 0-387-82477-4 (USA)., 1. (Cité en page 84.)
- [Hu et al., 2007] Hu, Z., Nechayev, Y., Hall, P., Constantinou, C., and Hao, Y. (2007). Measurements and statistical analysis of on-body channel fading at 2.45 ghz. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 6:612–615. (Cité en page 15.)
- [IEEE, 2011] IEEE (2011). Ieee standard for local and metropolitan area networks-part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). *IEEE Std*, 802(4):8482. (Cité en pages 10 et 17.)
- [IEEE, 2012] IEEE (2012). Ieee standard for local and metropolitan area networks-part 15.6: Wireless body area networks. *IEEE Standard for Information Technology, IEEE*, 802(6):1–271. (Cité en pages 13 et 19.)
- [Iutzeler et al., 2012] Iutzeler, F., Ciblat, P., and Jakubowicz, J. (2012). Analysis of max-consensus algorithms in wireless channels. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 60(11):6103–6107. (Cité en pages 88, 96, 97, 98, 99 et 100.)
- [Jensen et al., 2012] Jensen, U., Eskofier, B., and Dassler, F. (2012). Classification of kinematic golf putt data with emphasis on feature selection. In *Pattern Recognition (ICPR), 2012 21st International Conference on*, pages 1735–1738. (Cité en page 20.)
- [Jones and Ward, 2006] Jones, E. P. and Ward, P. A. (2006). Routing strategies for delay-tolerant networks. *Submitted to ACM Computer Communication Review (CCR)*. (Cité en page 83.)
- [Kar and Moura, 2009] Kar, S. and Moura, J. M. (2009). Distributed consensus algorithms in sensor networks with imperfect communication: Link failures and channel noise. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 57(1):355–369. (Cité en pages 87 et 101.)
- [Kim and Takada, 2009] Kim, M. and Takada, J.-i. (2009). Statistical model for 4.5-ghz narrowband on-body propagation channel with specific actions. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 8:1250–1254. (Cité en page 15.)
- [Kim et al., 2012] Kim, M., Wangchuk, K., and Takada, J. (2012). Link correlation property in wban at 2.4 ghz by multi-link channel measurement. In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, pages 548–552. (Cité en page 16.)

- [Kugler et al., 2011] Kugler, P., Schuldhaus, D., Jensen, U., and Eskofier, B. (2011). Mobile recording system for sport applications. In *Proceedings of the 8th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2011), Liverpool*, pages 67–70. (Cité en page 20.)
- [Kuhn et al., 2008] Kuhn, T., Jaitner, T., and Gotzhein, R. (2008). Online-monitoring of multiple track cyclists during training and competition (p81). In *The Engineering of Sport 7*, pages 405–412. Springer. (Cité en page 90.)
- [Kumar et al., 2010] Kumar, G. V., Reddy, Y. V., and Nagendra, D. M. (2010). Current research work on routing protocols for manet: a literature survey. *international Journal on computer Science and Engineering*, 2(03):706–713. (Cité en page 83.)
- [Kwak et al., 2010] Kwak, K.-S., Ullah, S., and Ullah, N. (2010). An overview of ieee 802.15.6 standard. In *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium on*, pages 1–6. (Cité en page 19.)
- [Lamprinos et al., 2005] Lamprinos, I., Prentza, A., Sakka, E., and Koutsouris, D. (2005). Energy-efficient mac protocol for patient personal area networks. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the*, pages 3799–3802. (Cité en page 17.)
- [Latré et al., 2011] Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., and Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wirel. Netw.*, 17(1):1–18. (Cité en page 11.)
- [Latre et al., 2007] Latre, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., Reusens, E., Joseph, W., and Demeester, P. (2007). A low-delay protocol for multihop wireless body area networks. In *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking Services, 2007. MobiQuitous 2007. Fourth Annual International Conference on*, pages 1–8. (Cité en page 18.)
- [Le et al., 2007] Le, A., Jaitner, T., and Litz, L. (2007). Sensor-based training optimization of a cyclist group. In *Hybrid Intelligent Systems, 2007. HIS 2007. 7th International Conference on*, pages 265–270. (Cité en page 90.)
- [Li and Tan, 2005] Li, H. and Tan, J. (2005). An ultra-low-power medium access control protocol for body sensor network. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005. 27th Annual International Conference of the*, pages 2451–2454. (Cité en page 17.)
- [Li and Tan, 2010] Li, H. and Tan, J. (2010). Heartbeat-driven medium-access control for body sensor networks. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 14(1):44–51. (Cité en page 18.)
- [Lipphardt et al., 2007] Lipphardt, M., Hellbrück, H., Pfisterer, D., Ransom, S., and Fischer, S. (2007). Practical experiences on mobile inter-body-area-networking. In

Bibliography

- Proceedings of the ICST 2Nd International Conference on Body Area Networks, BodyNets '07*, pages 7:1–7:8, ICST, Brussels, Belgium, Belgium. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). (Cité en page 91.)
- [MacKay, 2005] MacKay, D. J. (2005). Fountain codes. *IEEE Proceedings-Communications*, 152(6):1062–1068. (Cité en page 43.)
- [Maman et al., 2009] Maman, M., Dehmas, F., D’Errico, R., and Ouvry, L. (2009). Evaluating a tdma mac for body area networks using a space-time dependent channel model. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, pages 2101–2105. (Cité en pages 16 et 18.)
- [Maman et al., 2014] Maman, M., Denis, B., and D’Errico, R. (2014). Research trends in wireless body area networks: From on-body to body-to-body cooperation. In *Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 2014 8th International Symposium on*, pages 1–5. (Cité en page 19.)
- [Maman and Ouvry, 2011] Maman, M. and Ouvry, L. (2011). Batmac: An adaptive tdma mac for body area networks performed with a space-time dependent channel model. In *Medical Information Communication Technology (ISMICT), 2011 5th International Symposium on*, pages 1–5. (Cité en pages 18 et 71.)
- [Maréchal et al., 2010] Maréchal, N., Gorce, J.-M., and Pierrot, J. (2010). Joint estimation and gossip averaging for sensor network applications. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 55(5):1208–1213. (Cité en page 87.)
- [Marin-Perianu et al., 2013] Marin-Perianu, R., Marin-Perianu, M., Havinga, P., Taylor, S., Begg, R., Palaniswami, M., and Rouffet, D. (2013). A performance analysis of a wireless body-area network monitoring system for professional cycling. *Personal and Ubiquitous Computing*, 17(1):197–209. (Cité en page 89.)
- [Marinkovic et al., 2009] Marinkovic, S., Popovici, E., Spagnol, C., Faul, S., and Mar-nane, W. (2009). Energy-efficient low duty cycle mac protocol for wireless body area networks. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 13(6):915–925. (Cité en page 18.)
- [Minutolo and Annoni, 2014] Minutolo, R. and Annoni, L. (2014). Indoor localization with multi sensor data fusion in ad hoc mobile scenarios. In *Ultra-WideBand (ICUWB), 2014 IEEE International Conference on*, pages 403–408. (Cité en page 85.)
- [Motwani and Raghavan, 1995] Motwani, R. and Raghavan, P. (1995). *Randomized Algorithms*. Cambridge University Press, New York, NY, USA. (Cité en page 149.)
- [Movassaghi et al., 2014] Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., and Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 16(3):1658–1686. (Cité en pages 11, 13 et 17.)

- [Newman, 2004] Newman, M. E. (2004). Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical review E*, 69(6):066133. (Cité en page 87.)
- [Nhan et al., 2014] Nhan, N.-Q., Gautier, M., and Berder, O. (2014). Asynchronous mac protocol for spectrum agility in wireless body area sensor networks. In *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), 2014 9th International Conference on*, pages 203–208. (Cité en pages 19 et 82.)
- [Omeni et al., 2008] Omeni, O., Wong, A., Burdett, A., and Toumazou, C. (2008). Energy efficient medium access protocol for wireless medical body area sensor networks. *Biomedical Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 2(4):251–259. (Cité en page 18.)
- [Pal, 2010] Pal, A. (2010). Localization algorithms in wireless sensor networks: Current approaches and future challenges. *Network Protocols and Algorithms*, 2(1):45–73. (Cité en page 85.)
- [Patel and Wang, 2010] Patel, M. and Wang, J. (2010). Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies. *Wireless Communications, IEEE*, 17(1):80–88. (Cité en page 13.)
- [Penrose, 2003] Penrose, M. (2003). *Random geometric graphs*, volume 5. Oxford University Press Oxford. (Cité en page 99.)
- [Peterson and Weldon, 1972] Peterson, W. W. and Weldon, E. J. (1972). *Error-correcting codes*. MIT press. (Cité en pages 38 et 43.)
- [Pfisterer et al., 2006] Pfisterer, D., Lipphardt, M., Buschmann, C., Hellbrueck, H., Fischer, S., and Sauselin, J. H. (2006). Marathonnet: adding value to large scale sport events-a connectivity analysis. In *Proceedings of the first international conference on Integrated internet ad hoc and sensor networks*, page 12. ACM. (Cité en pages 30 et 90.)
- [Priyantha et al., 2003] Priyantha, N. B., Balakrishnan, H., Demaine, E., and Teller, S. (2003). Poster abstract: Anchor-free distributed localization in sensor networks. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '03*, pages 340–341, New York, NY, USA. ACM. (Cité en page 86.)
- [Proakis and Salehi, 2008] Proakis, J. and Salehi, M. (2008). *Digital Communications*. McGraw-Hill, 5th edition. (Cité en page 48.)
- [Reddy et al., 2010] Reddy, S., Shilton, K., Denisov, G., Cenizal, C., Estrin, D., and Srivastava, M. (2010). Biketastic: Sensing and mapping for better biking. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '10*, pages 1817–1820, New York, NY, USA. ACM. (Cité en page 89.)

Bibliography

- [Sarwate and Dimakis, 2012] Sarwate, A. and Dimakis, A. (2012). The impact of mobility on gossip algorithms. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 58(3):1731–1742. (Cité en page 87.)
- [Seah et al., 2009] Seah, W.-G., Eu, Z. A., and Tan, H. (2009). Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap) - survey and challenges. In *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on*, pages 1–5. (Cité en page 9.)
- [Shayeb et al., 2011] Shayeb, I. G., Hussein, A. H., and Nasoura, A. B. (2011). A survey of clustering schemes for mobile ad-hoc network (manet). *American Journal of Scientific Research*, 20(2011):135–151. (Cité en pages 83 et 87.)
- [Shin et al., 2013] Shin, H.-Y., Un, F.-L., and Huang, K.-W. (2013). A sensor-based tracking system for cyclist group. In *Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS), 2013 Seventh International Conference on*, pages 617–622. (Cité en page 89.)
- [Smith et al., 2011] Smith, D., Hanlen, L., and Lamahewa, T. A. (2011). A new look at the body area network channel model. In *Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on*, pages 2987–2991. (Cité en pages 15 et 16.)
- [Sorensen et al., 1987] Sorensen, H. V., Jones, D. L., Heideman, M., and Burrus, C. S. (1987). Real-valued fast fourier transform algorithms. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 35(6):849–863. (Cité en page 34.)
- [Spanos et al., 2005] Spanos, D. P., Olfati-Saber, R., and Murray, R. M. (2005). Dynamic consensus on mobile networks. In *IFAC world congress*. Prague Czech Republic. (Cité en page 87.)
- [Spyropoulos et al., 2005] Spyropoulos, T., Psounis, K., and Raghavendra, C. S. (2005). Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking, WDTN '05*, pages 252–259, New York, NY, USA. ACM. (Cité en pages 83 et 91.)
- [Terelius et al., 2012] Terelius, H., Varagnolo, D., and Johansson, K. H. (2012). Distributed size estimation of dynamic anonymous networks. (Cité en page 88.)
- [Tournoux et al., 2009] Tournoux, P., Leguay, J., Benbadis, F., Conan, V., Dias de Amorim, M., and Whitbeck, J. (2009). The accordion phenomenon: Analysis, characterization, and impact on dtn routing. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 1116–1124. (Cité en page 91.)

- [Tournoux et al., 2011] Tournoux, P.-U., Leguay, J., Benbadis, F., Whitbeck, J., Conan, V., and Dias de Amorim, M. (2011). Density-aware routing in highly dynamic dtms: The rollernet case. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 10(12):1755–1768. (Cité en page 91.)
- [Tse and Viswanath, 2005] Tse, D. and Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press. (Cité en page 14.)
- [Ullah et al., 2012] Ullah, S., Higgins, H., Braem, B., Latre, B., Blondia, C., Moerman, I., Saleem, S., Rahman, Z., and Kwak, K. (2012). A comprehensive survey of wireless body area networks. *Journal of Medical Systems*, 36(3):1065–1094. (Cité en pages 16 et 17.)
- [Čapkun et al., 2002] Čapkun, S., Hamdi, M., and Hubaux, J.-P. (2002). Gps-free positioning in mobile ad hoc networks. *Cluster Computing*, 5(2):157–167. (Cité en pages 85 et 86.)
- [Wang et al., 2013] Wang, L., Goursaud, C., Nikaein, N., Cottatellucci, L., and Gorce, J.-M. (2013). Cooperative Scheduling for Coexisting Body Area Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(1):123–133. (Cité en page 82.)
- [Whitbeck and Conan, 2010] Whitbeck, J. and Conan, V. (2010). Hymad: Hybrid dtn-manet routing for dense and highly dynamic wireless networks. *Computer Communications*, 33(13):1483 – 1492. (Cité en page 83.)
- [Xiao et al., 2005] Xiao, L., Boyd, S., and Lall, S. (2005). A scheme for robust distributed sensor fusion based on average consensus. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, IPSN '05, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press. (Cité en page 87.)
- [Yazdandoost et al., 2009] Yazdandoost, K. Y., Sayrafian-Pour, K., et al. (2009). Channel model for body area network (ban). *IEEE P802*, 15. (Cité en page 15.)
- [Yu et al., 2009] Yu, K.-M., Zhou, J., Yu, C.-Y., Liu, J.-Y., Lee, C.-C., Chang, H.-W., and Hsieh, H.-N. (2009). An event-based wireless navigation and healthcare system for group recreational cycling. In *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2009. MSN '09. 5th International Conference on*, pages 294–298. (Cité en page 89.)
- [Zanca et al., 2008] Zanca, G., Zorzi, F., Zanella, A., and Zorzi, M. (2008). Experimental comparison of rssi-based localization algorithms for indoor wireless sensor networks. In *Proceedings of the Workshop on Real-world Wireless Sensor Networks, REALWSN '08*, pages 1–5, New York, NY, USA. ACM. (Cité en page 86.)
- [Zhang et al., 2009] Zhang, J., Smith, D., Hanlen, L., Miniutti, D., Rodda, D., and Gilbert, B. (2009). Stability of narrowband dynamic body area channel. *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 8:53–56. (Cité en page 15.)

Bibliography

- [Zhang et al., 2010] Zhang, Q., Foh, C. H., Seet, B.-C., and Fong, A. (2010). Location estimation in wireless sensor networks using spring-relaxation technique. *Sensors*, 10(5):5171–5192. (Cité en page [86](#).)
- [Zhang and Dolmans, 2009] Zhang, Y. and Dolmans, G. (2009). A new priority-guaranteed mac protocol for emerging body area networks. In *Wireless and Mobile Communications, 2009. ICWMC '09. Fifth International Conference on*, pages 140–145. (Cité en page [18](#).)